Deutscher Bundestag **Drucksache 15/2713**
15. Wahlperiode 15. 03. 2004

Bericht

des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (17. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung

Technikfolgenabschätzung

hier: TA-Projekt – Nanotechnologie

Inhaltsverzeichnis

Seite

Seite

Vorwort des Ausschusses

Objekte, Strukturen und Prozesse, die auf Nanoebene, das heißt in Bereichen von wenigen bis 100 Nanometer (Nanometer = l Milliardstel Meter) angesiedelt sind, stehen seit wenigen Jahren im Zentrum des Interesses von Wissenschaft und Forschung. Mit der erfolgreichen Miniaturisierung von Werkzeugen und Maschinen, der Abläufe von Produktionsprozessen und Analyseverfahren werden Hoffnungen verbunden, dass die Nanotechnologie als Basis oder Schlüsseltechnologie die heutigen Möglichkeiten der Medizin, Biotechnologie, Pharmazie, der Elektronik, der Informations- und Kommunikations-, der Werkstofftechnik sowie der Energie- und Umwelttechnologien wesentlich erweitern wird. Neben den positiven Erwartungen werden aber auch kritische Stimmen laut, die u. a. vor den noch unkalkulierbaren Wirkungen kleinster Partikel auf Umwelt und Gesundheit warnen.

Vor dem Hintergrund der erwarteten enormen Chancen der Nanotechnologie für die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung hat der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung im Oktober 2000 das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag mit einer Technikfolgenanalyse beauftragt. Der vorliegende Abschlußbericht „Stand und Perspektiven der Nanotechnologie" führt zunächst umfassend in die Fachterminologie ein und vermittelt das zum Verständnis der Nanotechnologie notwendige Grundlagenwissen. Anschließend wird der Stand der deutschen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten und ihre Positionierung im internationalen Vergleich skizziert. Anzahl der Publikationen und Patentanmeldungen deuten auf eine starke Position Deutschlands in der Nanotechnologie hin. Um die starke Position zu halten und möglichst weiter auszubauen, wurden im Jahr 2001 öffentliche Mittel im Umfang von 150 Mio. Euro und 2002 im Umfang von 200 Mio. Euro für die Förderung der Nanotechnologie in Deutschland ausgegeben. Laut TAB-Bericht wurde in Deutschland mehr als die Hälfte der öffentlichen Mittel, die in der EU für die Nanotechnologieförderung ausgegeben wurden, für die Forschungsförderung zur Verfügung gestellt.

Die besonderen Eigenschaften kleinster Stoffe und Strukturen eröffnen eine Vielzahl neuer Anwendungsmöglichkeiten in der Medizin, Pharmazie, luK-Technik, Energiewirtschaft, Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie. Daher hat das TAB einen Schwerpunkt seines Berichtes auf die Darstellung der wichtigsten Anwendungsfelder der Nanotechnologie gelegt.

Die Autoren des Berichtes halten die Nanotechnologie für einen hochgradig zukunftsträchtigen Technologiebereich mit realistischen, visionären aber auch kritischen Aspekten. Sie stellen daher den großen Chancen auch mögliche Risiken gegenüber und fassen den ethisch-gesellschaftlichen Diskurs zusammen.

Optimisten sehen große Umsatzpotenziale in vielen Branchen voraus. Sie erwarten positive Effekte in den Bereichen Umwelt und Gesundheit u. a. durch die Entwicklung neuer Diagnose- und Therapieverfahren, die Entwicklung neuer und Optimierung bereits vorhandener Medikamente und agro-chemischer Produkte. Die Umwelt entlastende Effekte werden durch Ressourceneinsparung, Abfallverringerung und Effizienzsteigerungen im Energiebereich erwartet. Skeptiker weisen vor allem auf mögliche negative Auswirkungen unkontrolliert freigesetzter Nanopartikel auf den menschlichen Organismus hin.

Auf der Basis ihrer Untersuchungsergebnisse identifizieren die Autoren schließlich den notwendigen Klärungs- und Handlungsbedarf auf den Ebenen von Wissenschaft, Forschung und Politik im Hinblick auf Forschungsförderung, Umwelt-, Gesundheits- und Datenschutz, Aus- und Fortbildung und gesellschaftliche Kommunikation.

Die bundesweit erste umfassende Übersichtsstudie bietet wesentliche Hintergrundinformationen für die aktuelle und kommende politische Auseinandersetzung mit der Nanotechnologie und zu den Möglichkeiten ihrer Förderung.

Berlin, 1. März 2004

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung

Ulrike Flach, MdB
Ausschussvorsitzende, Berichterstatterin

Axel Fischer, MdB
Berichterstatter

Ulla Burchardt, MdB
Stellvertretende Vorsitzende, Berichterstatterin

Hans-Josef Fell, MdB
Berichterstatter

Zusammenfassung

Begriffe und Grundlagen

Nanotechnologie ist ein Sammelbegriff für eine weite Palette von Technologien, die sich mit Strukturen und Prozessen auf der Nanometerskala befassen. Ein Nanometer ist ein Milliardstel Meter (10^{-9} m) und bezeichnet einen Grenzbereich, in dem mehr und mehr quantenphysikalische Effekte eine wichtige Rolle spielen.

Wegen ihres Potenzials zur grundlegenden Veränderung ganzer Technologiefelder wird die Nanotechnologie als Schlüsseltechnologie angesehen, die in naher Zukunft nicht nur die technologische Entwicklung beeinflussen, sondern auch maßgebliche ökonomische, ökologische und soziale Implikationen mit sich bringen wird.

Eine allgemein anerkannte Definition der Nanotechnologie existiert bis heute nicht. Im vorliegenden Bericht wird folgende, pragmatisch zu verstehende Definition verwendet:

1. Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 nm sind.
2. Nanotechnologie macht sich charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer Ebene auftreten.
3. Nanotechnologie bezeichnet die gezielte Herstellung und/oder Manipulation einzelner Nanostrukturen.

Es gibt zwei grundlegende Strategien, um in die Nanodimension vorzustoßen. Auf der einen Seite gibt es den so genannten „Top-down“(=von oben nach unten)-Ansatz, der vor allem in der Physik und physikalischen Technik dominiert. Hier werden von der Mikrotechnik ausgehend Strukturen und Komponenten immer weiter miniaturisiert. Auf der anderen Seite steht der „Bottom-up“(=von unten nach oben)-Ansatz, bei dem immer komplexere Strukturen gezielt aus atomaren bzw. molekularen Bausteinen aufgebaut werden. Dieser Ansatz wird bislang eher durch die Chemie und Biologie repräsentiert, wo der Umgang mit Objekten in der Nanometerdimension seit langem vertraut ist.

Charakteristisch ist beim Übergang auf die Nanometerskala, neben der zunehmenden Dominanz quantenphysikalischer Effekte, dass Oberflächen- bzw. Grenzflächeneigenschaften gegenüber den Volumeneigenschaften des Materials eine immer größere Rolle spielen. Außerdem treten vielfach Selbstorganisations-Phänomene auf.

Als Basisstrukturen der Nanotechnologie werden betrachtet: punktförmige Strukturen, die in allen drei Dimensionen kleiner als 100 nm sind (z. B. Nanokristalle, Cluster oder Moleküle), linienförmige Strukturen, die in zwei Dimensionen nanoskalig sind (z. B. Nanodrähte, Nanoröhren und Nanogräben), Schichtstrukturen, die in nur einer Dimension nanoskalig sind, „inverse“ Nanostrukturen, also Poren, sowie komplexe Strukturen wie z. B. supramolekulare Einheiten oder Dendrimere. Ohne Verfahren und Werkzeuge, mit denen die oben genannten Basisstrukturen hergestellt und analysiert werden können, wäre die Nanotechnologie nicht denkbar. Daher werden die damit assoziierten Technologien ebenfalls diskutiert.

Die Nanotechnologie erfordert einen hohen Grad an interdisziplinärer und transdisziplinärer Kooperation und Kommunikation. Dies liegt zum einen darin begründet, dass auf der Nanoebene Begriffswelten der Physik, Chemie und Biologie miteinander „verschmieren“, zum anderen darin, dass die Methoden einer einzelnen Disziplin durch Verfahren und Fachkenntnisse aus den anderen Fachrichtungen ergänzt werden können oder müssen.

Forschung und Entwicklung im internationalen Vergleich

Der internationale Vergleich der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten anhand von bibliometrischen Daten und Patentindikatoren zeigt die starke Position Deutschlands im Bereich der Nanotechnologie.

Deutschland gehört zu den publikationsstärksten Akteuren in der Nanotechnologie und wird hier nur von den USA und Japan übertroffen. Auf Rang 4 folgt China. In Europa sind hinter Deutschland Frankreich und Großbritannien die Länder mit dem größten Publikationsaufkommen. Bezüglich des Anteils, den die Nanotechnologie am gesamten wissenschaftlichen Publikationsaufkommen hat, liegt Deutschland an fünfter Stelle, hinter China, Südkorea, Russland und Japan, aber deutlich über dem internationalen Durchschnitt. Die größten Wachstumsraten bei den Publikationen im Bereich der Nanotechnologie weisen Südkorea, China und Israel auf; der Wert für Deutschland entspricht dem internationalen Durchschnitt, der für die USA liegt deutlich darunter.

Bei den Patentanmeldungen liegt Deutschland auf Platz 2, hinter den USA, aber vor Japan. Es folgen Frankreich und Großbritannien. Anders als beim Publikationsaufkommen zählt China hier nicht zu den Top-10-Akteuren. Der Anteil der nanotechnologierelevanten Patente am gesamten Patentaufkommen liegt in Deutschland leicht über dem internationalen Durchschnitt, die jährlichen Wachstumsraten der Patentanmeldungen sind allerdings leicht unterdurchschnittlich. In allen betrachteten Ländern liegt die Wachstumsrate der nanotechnologierelevanten Patentanmeldungen deutlich über der Wachstumsrate der Patentanmeldungen insgesamt.

Für die deutsche Forschung gilt es, diese starke Position im Bereich der Nanotechnologie zu behaupten und möglichst weiter auszubauen. Hierzu werden erhebliche Anstrengungen unternommen. Von zentraler Bedeutung ist dabei die seit Anfang der 1990er-Jahre bestehende Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, die von ca. 35 Mio. Euro im Jahre 2000 auf über 88 Mio. Euro in 2002 angewachsen ist und die 2003 auf 112 Mio. Euro steigen soll. Seit 1998 gibt es die Förderinitiative „Kompetenzzentren Nanotechnologie“ und seit 2002 einen Nachwuchswissenschaftler-Wettbewerb im Bereich Nanotechnologie. Auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit und die Deutsche Forschungsgemeinschaft sind an der Förderung der Nanotechnologie beteiligt. Die Max-Planck-Gesellschaft, die Helmholtz-

Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren und die Wissensgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz setzen beträchtliche Mittel für die Weiterentwicklung der Nanotechnologie ein. Insgesamt wurden im Jahre 2002 öffentliche Mittel in Höhe von ca. 200 Mio. Euro für die Nanotechnologie eingesetzt, gegenüber ca. 150 Mio. Euro in 2001.

Damit entfiel auf Deutschland mehr als die Hälfte der öffentlichen Mittel, die im EU-Raum für die Nanotechnologie bereitgestellt wurden.

Überblick über wichtige Anwendungsfelder

Die Verkleinerung von Abmessungen bis in den Nanometerbereich hinein führt oft zu charakteristischen, für neue Anwendungen nutzbaren Eigenschaften von Stoffen und Werkstoffen, die bei makroskopischen Stücken des gleichen Materials nicht auftreten. Dazu gehören z. B. deutlich höhere Härte, Bruchfestigkeit und -zähigkeit bei niedrigen Temperaturen sowie Superplastizität bei hohen Temperaturen, die Ausbildung zusätzlicher elektronischer Zustände, hohe chemische Selektivität der Oberflächenstrukturen und eine deutlich vergrößerte Oberflächenenergie.

Durch den kontrollierten Aufbau makroskopischer Körper aus atomaren und molekularen Bausteinen lassen sich deren Eigenschaften gezielt einstellen. Das Verständnis der molekularen Grundlagen neuer Materialien eröffnet Perspektiven für die Herstellung neuer „schaltbarer“ Werkstoffe, die mit konventionellen Methoden nicht herstellbar sind.

Insgesamt gesehen ist der Entwicklungsstand von Produkten, Produktideen und Konzepten der Nanotechnologie sehr unterschiedlich; ihr Realisierungszeitpunkt reicht von der Gegenwart bis weit in die Zukunft. Eine Reihe von Anwendungen befindet sich bereits in der Phase der Realisierung, wobei es sich eher um Top-down-Ansätze handelt. Neuere Anwendungen – eher die Bottom-up-Ansätze – sind erst mittel- bis langfristig zu erwarten.

Oberflächenfunktionalisierung und -veredelung

Unter marktrelevanten Aspekten befindet sich die Nanotechnologie im Bereich Oberflächenfunktionalisierung und -veredelung bereits in einem relativ fortgeschrittenen Stadium. Teilweise bereits in der industriellen Anwendung befinden sich Nanomultischichten und Nanoverbundschichten, die sich durch verbesserte mechanische und tribologische Eigenschaften auszeichnen. Weitere Beispiele sind quasi „selbstreinigende“ Oberflächen, die gleichzeitig hydrophobe und oleophobe Eigenschaften aufweisen. Auch schon im Einsatz befinden sich optischfunktionale Oberflächen für Fassaden, Kraftfahrzeuge, Solarzellen etc. (z. B. zur Entspiegelung, Sonnenschutzverglasung, Antireflexbeschichtung für Instrumententafeln).

Durch den Zusatz von Nanopartikeln in konventionelle Lacke ergeben sich neue und verbesserte, nanobasierte Farbeffekte. In der Anwendung befinden sich bereits Pigmentruße aus agglomerierten Nanopartikeln in hochwertigen schwarzen Lacken. Über schaltbare bzw. in der Farbe veränderbare Lacke und selbstausheilende Lacke wird diskutiert.

Katalyse, Chemie und Werkstoffsynthese

In der chemischen Industrie werden katalytische Nanopartikel bereits eingesetzt. Im Nanobereich werden auch völlig neue Materialien als Katalysatoren erschlossen (z. B. Gold-Nanopartikel). Nanoreaktoren (z. B. Dendrimere) ermöglichen eine völlig neue Art der räumlichen Prozesskontrolle im Nanometermaßstab. Durch so genannte supramolekulare Wirt-Gast-Strukturen eröffnen sich neue Synthesewege in der organischen Chemie. Die Regio- und Stereo-Selektivität von Katalysatoren kann erhöht werden. Oberflächenaktive Membranen, nanoporöse (Bio)Filter und Adsorptionsmittel sind aus nanotechnologischer Sicht optimierbar, z. B. zur Abwasseraufbereitung, Schadstoffbeseitigung und Nebenproduktabtrennung.

Durch die nanotechnologische Verbesserung bereits verfügbarer Katalysatoren (z. B. Zeolithe) werden Trägerkatalysatoren mit neuen Eigenschaften zugänglich. Durch ein kontrolliertes Aufwachsen der Katalysatorpartikel auf nanoskalige Trägermaterialien wird eine präzise Kontrolle der Katalysatoreigenschaften möglich. In Zukunft wird es verstärkt möglich sein, heterogene Katalysatoren für gewünschte Reaktionen maßzuschneidern. Durch molekulares Prägen (Molecular Imprinting) gelingt der Aufbau spezifischer Polymere (MIPs) mit hoher Selektivität. Dabei können biomimetische, enzymanaloge Katalysatoren gewonnen werden, die Vorteile gegenüber Enzymen u. a. in ihrer Einsetzbarkeit bei extremen Reaktionsbedingungen aufweisen.

Energieumwandlung und -nutzung

Mit dem Einsatz der Nanotechnologie kann die Effizienz der Energieumwandlung erhöht werden. Dabei stehen materialseitige Verbesserungen im Vordergrund (z. B. Einsatz nanotechnologischer Werkstoffe in der Photovoltaik und in Brennstoffzellen). Ein weiterer Schwerpunkt ist die verlustarme Speicherung von Energie. Dabei stellt die effiziente Speicherung von Wasserstoff nach wie vor eine Herausforderung dar. Durch Methoden der Mikro- und Nanostrukturierung lässt sich etwa der Massenanteil des Wasserstoffs bei chemischer Speicherung erhöhen. An der Speicherung von Wasserstoff in Nanoröhren aus Kohlenstoff und anderen Fulleren-Derivaten wird – in Erwartung höherer Massenanteile – weiter geforscht.

Nanomaterialien können zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Batterien, von Mini-Akkus (z. B. durch Verwendung von Nanoröhren in Lithium-Ionen-Akkus) und bei elektrochemischen Kondensatoren (Superkondensatoren) genutzt werden. Zudem ist die Kombination von Superkondensatoren mit Batterien auch für Antriebszwecke vielversprechend (z. B. Speicherung der Bremsenergie im Elektromobil). Die hohen Verluste beim Stromtransport

machen die Verwendung von supraleitenden Leitungen interessant. Dabei setzt man Hoffnung auf Nanoröhren, bei denen Supraleitfähigkeit bei Raumtemperatur für möglich gehalten wird.

Konstruktion

Entscheidende Materialgrößen (Härte, Verschleißfestigkeit etc.) können durch die Einführung charakteristischer Strukturgrößen im Nanometerbereich gezielt verbessert werden. Viele Strukturanwendungen nanokristalliner Werkstoffe ergeben sich aus einer Verteilung von Nanopartikeln in einer keramischen, metallischen oder Polymer-Matrix.

Beispielsweise verbessert das Einbringen von nanoskaligen Teilchen in Metallen deren mechanische Eigenschaften, womit ein wesentlicher Beitrag zum Leichtbau geleistet werden kann. Mit Nanopartikeln versehene Polymere besitzen Merkmale, die zwischen denen von organischen Polymeren und anorganischen Keramiken liegen. Einsatzmöglichkeiten derart optimierter Materialien finden sich in besonders beanspruchten Bereichen des Leichtbaus oder in Hochtemperaturanwendungen, aber auch in Massenanwendungen wie Kunststoff-Gehäusen oder -Verkleidungen. Hervorzuheben ist z. B. das duktile Verhalten von nanostrukturierten Keramiken, die bisher als ausschließlich spröder Werkstoff bekannt waren. Für die Praxis ergibt sich daraus eine Vielzahl an Innovationen in der keramischen Technologie. Wesentliche Eigenschaftsverbesserungen sind auch bei Baustoffen durch Beimischen von Nanozusatzstoffen möglich (z. B. Hochleistungsbetone mit höheren Druckfestigkeiten bei verbessertem Verschleiß- und Erosionswiderstand).

Nanosensoren und Aktuatoren

Für die Vermessung von Mikro- und Nanostrukturen werden zerstörungsfreie Messverfahren mit Nanometergenauigkeit benötigt. Eine Vielzahl von Sensoren wird durch die Nanotechnologie erst ermöglicht. Zur Detektion mechanischer Größen werden z. B. Magnetfeldsensoren verwendet (z. B. in Airbag-Systemen, Leseköpfen von Festplattenspeichern). Mit Infrarot-Sensoren lässt sich eine hohe thermische und räumliche Auflösung realisieren; den höchsten Entwicklungsstand haben zurzeit Infrarot-Detektormosaike aus Quantentrog-Infrarot-Photodetektoren. Im Arznei- und Lebensmittelbereich werden kommerziell Markierungen („Thermolabels“) auf Nanotechnologiebasis angeboten, die durch Verfärbung Temperaturüber- oder -unterschreitung anzeigen. Mit dem Rasterwärmemikroskop kann die thermische Leitfähigkeit bzw. Temperaturverteilung z. B. von elektronischen Bausteinen hochauflösend vermessen werden. Viele Oxide kommen erst in nanokristalliner Form für eine Verwendung als Sensormaterial, etwa für Chemosensoren (z. B. Glukosesensor mit Farbumschlag zur Bestimmung des Blutzuckergehaltes), infrage. Ein Beispiel für Biosensoren sind so genannte Lab-on-a-Chip-Systeme.

Informationsverarbeitung und -übermittlung

Die wichtigsten Anwendungsgebiete der Nanoelektronik im Bereich der Informationsverarbeitung und -übermittlung sind elektronische, optische bzw. optoelektronische Bauelemente. Durch Nanotechnologie werden auch im Bereich der Fertigungstechnik kostengünstigere oder präzisere Verfahren erwartet.

Die technisch beherrschte Größenordnung von Logik- und Speicherbausteinen in der heute dominierenden CMOS-Technik verschiebt sich zunehmend in die Nanometerdimension (Quantenpunkte, Kohlenstoffnanoröhren). Photonische Kristalle weisen ein Einsatzpotenzial für rein optische Schaltkreise auf, etwa als Grundlage für eine zukünftige nur auf Licht basierende Informationsverarbeitung (Photonik). In der molekularen Elektronik lassen sich mithilfe der Nanotechnologie elektronische Bauelemente mit neuen Eigenschaften auf atomarer Ebene zusammensetzen, mit Vorteilen u. a. in einer potenziell hohen Packungsdichte.

Neue Konzepte für Komponenten beruhen vor allem auf der Nutzung quantenmechanischer Effekte für die Realisierung kleinerer, schnellerer oder anderweitig besserer Bauelemente. Längerfristig werden durch die Nutzung der Nanotechnologie im IuK-Bereich aber auch neue Architekturen möglich. Ein Beispiel für ein neuartiges biochemisches Rechnerkonzept ist das so genannte DNA-Computing.

Lebenswissenschaften

Durch den Einsatz der Nanotechnologie werden u. a. Verbesserungen bei medizinischer Diagnose und Therapie, „Leistungssteigerungen“ beim Menschen und Ertragssteigerungen bei Tieren und Pflanzen erwartet. Mögliche Anwendungen sind unter anderem in der Analytik und Diagnostik, der nanotechnologischen Herstellung von Wirkstoffen, dem ortsgenauen Wirkstofftransport sowie der Herstellung biokompatibler Materialien und Oberflächen zu finden.

Bei der Ernährung stehen derzeit nanotechnologisch hergestellte Verpackungen sowie Farb- und Zusatzstoffe im Vordergrund. Künftig dürfte Nanotechnologie auch im Bereich des „Functional Food“ eine Rolle spielen, wo sie die Verfügbarkeit bioaktiver Substanzen erhöht. In Kosmetika werden Nanopartikel bereits eingesetzt, z. B. für Sonnenschutzmittel mit verbesserten Eigenschaften.

Sicherheit und Rüstung

Der Einsatz der Nanotechnologie in der Rüstung eröffnet Wege zu verbesserten Waffen, innovativen Materialien und neuen Anwendungsbereichen. Bei Land- und Luftfahrzeugen könnten herkömmliche Strukturwerkstoffe zum Teil durch festere und leichtere Materialien ersetzt werden. Zudem könnten Verbesserungen beim direkten (Panzerungen) und indirekten Schutz militärischer Fahrzeuge (Tarnen und Täuschen, z. B. durch Farbwechsel mit „intelligenten“ Oberflächenbeschichtungen) erreicht werden. Wichtige Auswirkungen der Nanotechnologie

auf den Betrieb militärischer Trägersysteme sind bei der Wandlung und Speicherung von Energie zu erwarten (z. B. effizientere Solarzellen, geeignete Membranen und Katalysatoren zum Betrieb von Brennstoffzellen sowie leistungsgesteigerte Batterien). Nanoskalige elektronische, sensorische und elektromechanische Komponenten könnten die Steuerung und Regelung von Fahrzeugen leistungsfähiger und robuster machen. Der bereits bestehende Trend zu unbemannten/autonomen Systemen in den Bereichen Luft, See und Weltraum könnte sich hierdurch noch verstärken.

In der militärischen Aufklärung gibt es eine Vielzahl von möglichen Anwendungen, die auf der Nutzung von nanotechnologischen Komponenten für Sensoren, Sensorsysteme und Sensornetze basieren. Auch der Bereich der Waffen und Munition wird unmittelbar von den verbesserten sensorischen Fähigkeiten sowie von der Erhöhung der Rechenleistung und Speicherkapazität durch Nanotechnologie beeinflusst. Eine weitere Option ist hier die Entwicklung nanoskaliger Pulver für den Einsatz in Treibmitteln und Sprengstoffen, wodurch sich Energieausbeute und Explosionsgeschwindigkeit erhöhen lassen.

Nanotechnologische Entwicklungen werden vermutlich erhebliche Auswirkungen für das militärischen Personal haben, unter anderem auf der Ebene der persönlichen Ausstattung (Stichwort: „Soldier as a System“). Im Vordergrund steht das Bestreben, Soldaten mit zusätzlichen Funktionalitäten auszustatten, ohne das Gewicht der Ausrüstung wesentlich zu erhöhen.

Vertiefung: Anwendungen in ausgewählten Industriebranchen

Potenziale für Anwendungen der Nanotechnologie bestehen in praktisch allen Industriezweigen, auch in solchen, die eher zu den Lowtech-Branchen gerechnet werden. Die hier analysierten sechs Branchen – Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrtindustrie, Bauwesen, Textilindustrie, Energiewirtschaft und Chemische Industrie – repräsentieren einen bedeutsamen Ausschnitt aus dem zukünftigen industriellen Gesamtpotenzial der Nanotechnologie.

Automobilindustrie

Im Automobilbau der Zukunft wird nanotechnologische Kompetenz zu den Kernfähigkeiten gehören, die erforderlich sind, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit dieser für die deutsche Volkswirtschaft so wichtigen Branche zu erhalten. Das Spektrum nanotechnologischer Innovationsbemühungen im Automobilbau reicht von bereits eingesetzten Komponenten über konkrete Entwicklungsaktivitäten bis hin zu Ideen mit allenfalls langfristiger Realisierbarkeit. Zum Teil handelt es sich dabei um grundlegend neue Entwicklungen mit weit reichenden Auswirkungen auf das Produkt. Es werden Spin-off-Effekte in viele andere Branchen hinein erwartet.

Nanotechnologische Entwicklungen können in allen Subsystemen bzw. Komponenten des Automobils eine Rolle spielen. Beispiele sind:

- Nanopartikel als Füllstoff in Autoreifen (realisiert, Weiterentwicklung),
- Antireflexbeschichtungen (realisiert),
- nanopartikelverstärkte Polymere und Metalle (Entwicklungsphase, zum Teil realisiert),
- nanotechnologisch modifizierte Klebetechniken und Haftvermittler (in Entwicklung),
- katalytische Nanopartikel als Zusatz in Kraftstoffen (Forschungsstadium),
- nanoporöse Filter zur Minimierung der Emission von Partikeln im Nanometerbereich (Zukunft),
- hydrophile Oberflächenschichten als Antibeschlagschichten (Zukunft),
- „selbstausheilende“ Lacke, z. B. durch Selbstorganisation (allenfalls langfristig).

Luft- und Raumfahrtindustrie

Auch in der Luft- und Raumfahrtindustrie bestehen für die Nanotechnologie mittel- bis langfristig erhebliche Anwendungsmöglichkeiten. Im Bereich der Raumfahrt sind diese Möglichkeiten besonders vielfältig, andererseits sind hier die Anforderungen an die technologische Leistungsfähigkeit der Komponenten oft extrem hoch. Ökonomische Anwendungsbarrieren ergeben sich aus dem erforderlichen finanziellen Aufwand für die Entwicklung von Nanotechnologieprodukten bei gleichzeitig niedrigen Stückzahlen, vor allem im Bereich der Raumfahrt.

Wichtige Anwendungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Strukturwerkstoffe (z. B. Gewichts- und Energieeinsparung durch Einsatz leichtgewichtiger, hochfester nanotechnologiebasierter Materialien), Informations- und Kommunikationstechnik (z. B. effizientere Gestaltung der Datenübertragung zwischen Raumfahrzeugen und terrestrischen Informationsnetzen mithilfe elektronischer und optoelektronischer Nanotechnologiekomponenten), Sensorik (z. B. Verbesserung der medizinischen Überwachung von Astronauten durch Sensoren auf der Basis nanostrukturierter Materialien) und Thermalschutz/Thermalkontrolle (z. B. Verbesserung thermischer Kontrollsysteme durch nanostrukturierte diamantartige Kohlenstoffschichten).

Bauwesen

Auch im Bauwesen gibt es eine Fülle von Möglichkeiten für Anwendungen nanotechnologischer Entwicklungen. So können Siliziumdioxid-Nanopartikel in synthetischen Kieselsäuren (Nanosilica) als Zusatzmittel für Spritz- und Hochleistungsbeton eingesetzt werden und zur Verbesserung der Haftzug- und Haftscherfestigkeit zwischen Beton und Bewehrungsstahl beitragen. Durch nanometerdünne Multilagenbeschichtung aus leitenden Polymeren ist ein verbesserter Korrosionsschutz bei Verwendung von Karbonstahl oder Edelstahl als Baumaterial realisierbar. Weitere Anwendungen finden sich im Bereich der Gebäude-Wärmedämmung (z. B. Einsatz von Fenster-

flächen zur transparenten Wärmedämmung durch Aufbringen einer wenige nanometerdicken, unsichtbaren Silberschicht), bei der Außenflächengestaltung (z. B. Einstellung von Funktionen wie Selbstreinigung, Anti-Graffiti-Schutz oder hohe Kratz- und Abriebfestigkeit bei Kunststoffen durch geeignete Beschichtungen) und im Innenbereich (z. B. Einsatz von Titandioxid-Nanopartikeln als Additive in Lacken zum Schutz vor Verfärbungen durch Kunst- und Tageslicht).

Textilindustrie

In der Textilindustrie richten sich die Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen besonders auf die Integration neuer funktionaler Eigenschaften in textile Materialien, um einen Zusatznutzen (und damit Wettbewerbsvorteile) zu erzeugen. Es gibt hier einerseits einige wenig realistische Visionen, wie etwa die Integration von Nanorobotern, die einem Kleidungsstück eine ausgeprägte Selbstreparaturfähigkeit verleihen sollen. Durchaus erfolgversprechend dürften andererseits die Bemühungen um Verbesserungen bei Eigenschaften bzw. Funktionen wie Knitterfreiheit, Atmungsaktivität, Verschleißfestigkeit, Abstoßen von Flecken und Wasser, Antistatik, Wirkstoffdepot oder Feuerschutz sein.

Energiewirtschaft

Von Entwicklungen im Bereich der Nanotechnologie werden erhebliche Einflüsse auf die zukünftige Energieproduktion und Energieverteilung erwartet. Zu nennen sind vor allem nanotechnologiebedingte Fortschritte bei Solarzellen, bei der Speicherung von Energie und bei Brennstoffzellen.

Hoffnungen, mithilfe nanotechnologischer, bei Raumtemperatur supraleitender Materialien die hohen Leitungsverluste unserer zentralisierten Energieversorgung zu reduzieren, sind umstritten.

Chemische Industrie

Die Chemische Industrie ist eng mit der Entwicklung der Nanotechnologie verknüpft: Sie ist einerseits Lieferant wesentlicher Grundstoffe, andererseits zukünftiger Nutzer nanotechnologiebasierter verfahrenstechnischer Innovationen. Von der Nanotechnologie wird erwartet, dass die Chemische Industrie aus ihr neue Innovationsdynamik schöpfen kann.

Zahlreiche Produkte der Chemischen Industrie, die heute dem Bereich Nanotechnologie zugerechnet werden, gibt es schon seit Jahrzehnten. In vielen Bereichen zeichnen sich aber neue Nanoprodukte ab, die aufgrund ihres potenziellen Marktvolumens wirtschaftlich relevant sind.

Hauptanwendungsgebiete der Nanotechnologie in der Chemischen Industrie sind die Katalyse, die Erzeugung von Füllstoffen, Pigmenten, Beschichtungen und Schmierstoffen, die Mikro-/Nanoreaktionstechnik, Membranen und Filter sowie Pharma und Kosmetik.

Vertiefung: Anwendungen in der Informations- und Kommunikationstechnik

Die Informations- und Kommunikationstechnik ist ein wichtiger und weiterhin stark wachsender Wirtschaftsbereich mit einem hohen Innovationstempo. Nach einer jahrzehntelangen Schwäche hat die deutsche Industrie in diesem Sektor in den vergangenen Jahren enorm aufgeholt und besitzt heute gute Voraussetzungen, die Herausforderungen der kommenden Jahre zu meistern, vor allem den Übergang von der traditionellen zur nanotechnologischen Elektronik.

Diese Entwicklung wird getragen von der „Top-down-Entwicklung“ der Mikroelektronik hin zur Nanotechnologie, d. h. der zunehmenden Miniaturisierung bis an die Grenzen der Festkörperphysik, bei der ein Übergang zur „Bottom-up-Nanotechnologie“ zwingend wird. Letztere befindet sich heute aber noch weitgehend im Bereich der Grundlagenforschung. Nanotechnologische Konzepte und Verfahren werden die weitere Entwicklung der Elektronikindustrie und deren industrielle Kontinuität mittelfristig – beginnend im Zeitraum zwischen 2005 und 2010 – sichern. Dabei existieren zahlreiche Produkte, Produktideen und Konzepte, deren Realisierungszeitpunkte von der Gegenwart bis zu einer ungewissen Zukunft reichen.

Bei neuen Logik- und Speichertechnologien werden nanotechnologische Ansätze schnell eine wichtige Rolle spielen. So ist bereits in naher Zukunft mit der Einführung von magnetischen RAMs und Resonanztunnelelementen in Logikschaltkreisen zu rechnen. Mittelfristig Erfolg versprechende Ansätze sind beispielsweise Einzelflussquanten-Logik (RSFQ) oder Einzel-Elektronen-Transistoren. Eine vollständig molekulare Elektronik – sei es auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren oder organischen Makromolekülen – liegt hingegen noch in weiter Ferne. Insgesamt geht es hier darum, Impulse aus der Grundlagenforschung für die industrielle Technologieentwicklung nutzbar machen. Tendenziell gilt hier – wie in der Vergangenheit bei der CMOS-Technologie –, dass Lösungen im Speicherbereich solchen bei Logikschaltkreisen um einige Jahre vorauseilen. Die nichtklassische CMOS-Technologie ist eine Fortsetzung der bekannten und beherrschten Mikroelektronik bis weit in die Nanometerdimension hinein. Hier wird insbesondere mit neuen Produktionsverfahren und Werkstoffen kurz- bis mittelfristig versucht, identifizierte technisch-wirtschaftliche Lücken entlang der vertikalen Wertschöpfungsketten bedarfsgerecht auszugleichen. Unabhängig vom Erfolg der alternativen Ansätze wird die CMOS-Technologie auch in absehbarer Zukunft das Arbeitspferd der Halbleiterindustrie bleiben.

Der Marktdurchbruch zur Nanotechnologie in der Informations- und Kommunikationstechnik könnte sich also in zwei Schritten vollziehen: Zunächst wird im Zuge der Top-down-Miniaturisierung die herkömmliche Mikrostrukturierung die Grenze zur Nanotechnologie überschreiten. Längerfristig könnten Bottom-up-Nanoelektronik und Nanosystemtechnik hinzutreten, in denen „echte“ Nanotechnologien eingesetzt werden, etwa solche, die

Selbstorganisationsprozesse für den Aufbau von Schaltkreisen und Systemen nutzen.

Neuartige, Nanotechnologie nutzende Systemarchitekturen sind die am weitesten in der Zukunft liegenden Entwicklungen. So befinden sich sowohl das DNA- als auch das Quanten-Computing noch im Stadium der Erforschung der Grundlagen. Erst seit relativ kurzer Zeit ist der experimentelle Nachweis der grundlegenden Funktionsprinzipien erbracht worden. Daher ist eine technische Nutzung kurz- bis mittelfristig nicht absehbar. Zumindest theoretisch besitzen beide Technologien durch die Möglichkeit zur massiven Parallelisierung der Datenverarbeitung erhebliches Potenzial für die Erhöhung der Rechengeschwindigkeit. Darüber hinaus besitzen beide inhärente Vorteile. So hat das DNA-Computing überall dort Vorteile, wo – die in Zukunft immer wichtiger werdende – Schnittstelle zu biochemischen Prozessen von Bedeutung ist. Mit dem Quantencomputer wird hingegen die Lösung von Problemen möglich, für die es keine effizienten klassischen Algorithmen gibt.

Wegen der großen Unwägbarkeiten wird insbesondere die Entwicklung von Quantencomputern auf industrieller Seite von solchen Unternehmen betrieben, die traditionell grundlagennahe Forschung betreiben. Hierzu gehören insbesondere IBM, Hewlett-Packard und Lucent-Technologies (ehem. Bell Labs). Deutsche Akteure finden sich kaum. Da zudem die Quantenkryptographie vor allem für militärisch-nachrichtendienstliche Anwendungen entwickelt wird, besteht für Deutschland das Risiko, auf diesem potenziell wichtigen Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnik frühzeitig den Anschluss zu verlieren.

Für beide Ansätze dürfte allerdings klar sein, dass sie den klassischen Computer für universelle Anwendungen im privaten und geschäftlichen Umfeld wegen des vergleichsweise hohen apparativen Aufwandes kaum ablösen dürften. Es wird sich also noch erweisen müssen, wie breit letztlich die Anwendungsbereiche sind, in denen DNA- bzw. Quantencomputer ihre inhärenten Vorteile ausspielen können. Die Frage, ob es sich um künftige Schlüsseltechnologien handelt, kann daher heute noch nicht beantwortet werden. Dies gilt umso mehr, als durch die Entwicklung nanoelektrischer Bauelemente auch herkömmliche Architekturen nochmals einen erheblichen Leistungsschub erfahren werden.

Eine wichtige Rolle für Innovationsanstrengungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechniken spielt das Paradigma der Systeme der allgegenwärtigen Informationsverarbeitung (Ubiquitous Computing). Diese Anwendungsvision setzt wichtige Beiträge der Nanotechnologie für ihre technische Basis voraus. So wird beispielsweise die propagierte totale und nahtlose Vernetzung von Mensch und Maschine erst durch die Entwicklung von höchstintegrierter (Opto-)Elektronik in Verbindung mit leistungsfähiger Funktechnik zu preiswerten Massenprodukten möglich. Von der Nanotechnologie sollen wichtige Impulse für die extreme Miniaturisierung, die Konstruktion neuartiger Sensoren und die Möglichkeit zur Produktion billiger und leistungsfähiger polytronischer Schaltungen ausgehen. Dieses Anwendungsgebiet weist aber auch eine Vielzahl von technikinduzierten Implikationen auf. So stellt die Möglichkeit zur Sammlung, Verbreitung und Verarbeitung einer Vielzahl von teilweise personenbezogenen Daten die Technik, den Staat und die Gesellschaft vor zahlreiche Probleme aus den Bereichen der Persönlichkeitsrechte – insbesondere des Datenschutzes, der informationellen Selbstbestimmung und der wachsenden Abhängigkeit wichtiger gesellschaftlicher Funktionen von technischen Infrastrukturen.

Vertiefung: Anwendungen in den Lebenswissenschaften

Zu den Lebenswissenschaften im engeren Sinn zählen Biologie und Humanmedizin sowie Veterinärmedizin mit den entsprechenden anwendungsorientierten Disziplinen, z. B. Medizintechnik und Biotechnologie. Berührungspunkte ergeben sich zu den dortigen biotechnischen Entwicklungen; dazu zählen beispielsweise neue biomedizinische Therapien (Gentherapie, Zelltherapie, Xenotransplantation etc.), künstliche Implantate (Gewebe und Organe), die individualisierte Medizin (Pharmakogenomik etc.), aber auch die Telemedizin. Im weiteren Sinne können auch Pharmazie, Kosmetik, Ökotrophologie, Agrarwissenschaft, Forstwissenschaft und Umweltwissenschaften zu den Lebenswissenschaften gezählt werden. Das Hauptaugenmerk liegt in diesem Kapitel auf den Anwendungen der Nanotechnologie in den biomedizinischen Bereichen.

Nanotechnologie und Lebenswissenschaften ergänzen sich gegenseitig in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche. Aktuell zeichnet sich ein breites Spektrum von technischen Entwicklungen im Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften ab. Berührungspunkte zwischen Nanotechnologie und Lebenswissenschaften ergeben sich insbesondere dort, wo Nanotechnologie eingesetzt wird, um Ziele der Biowissenschaften zu erreichen, und/oder Nanotechnologie von Erkenntnissen und Verfahren aus den Biowissenschaften profitiert.

Unter der „Transferrichtung Nano2Bio“ ist die Nutzung nanotechnologischer Verfahren und Materialien für die Untersuchung biologischer Fragestellungen zu verstehen. Unter diesem Blickwinkel sind unter anderem Nanoanalytik, Nanomanipulationstechniken für biologische Strukturen und Objekte, nanotechnologisch hergestellte Wirkstoffe für lebende Organismen, Nanofähren für den Transport von Wirkstoffen, Nanomaschinen, Nanorobotik für Forschung, Diagnostik und Therapie, nanotechnologisch beschichtete Implantate sowie nanoelektronische, insbesondere neurologische Implantate als Anwendungsperspektiven zu nennen. Die „Transferrichtung Bio2Nano“ steht für bio(techno)logische Materialien und Baupläne zur Herstellung technischer Nanosysteme. Diese könnten in den Bereichen Information und Kommunikation, Energie und Umwelt u. a. m. für technische Anwendungen nutzbar gemacht werden. Zu nennen sind hier z. B. nanotechnologische Anwendungen nach biolo-

gischen Vorbildern, der Einsatz biologischer Bausteine im Nanomaßstab für technische Systeme oder die Nanoelektronik und Nanoinformatik unter Verwendung biologischer Bausteine, Funktions- oder Organisationsprinzipien.

Im Überblick lässt sich konstatieren, dass sich für die nächsten Jahre marktfähige Anwendungen vor allem bei Implantaten und Transplantaten und im Bereich der Drug-Delivery-Systeme für Medizin, Ernährung und auch Kosmetik abzeichnen. Bei der Analyse von Nanostrukuren nimmt die Rastersondenmikroskopie eine führende Position ein. Einige nanotechnologische Produkte überzeugen durch ein neuartiges Leistungsspektrum bzw. hohe Wirksamkeit. Die Einführung solcher Produkte, die bereits bestehende Entwicklungen fortführen, erfolgt jedoch weitgehend, ohne dass der Bezug zur Nanotechnologie in der Öffentlichkeit besonders wahrgenommen wird.

Im Rahmen des Berichtes wurden primär die Anwendungsbereiche berücksichtigt; sekundär einbezogen sind auch die angewendeten Verfahren. Viele Vorhaben befinden sich zurzeit noch im Stadium der Grundlagenforschung, der Anwendungsbezug ist daher zum Teil prospektiv zu verstehen. Im Folgenden werden die wichtigsten Anwendungsschwerpunkte der Nanotechnologie insbesondere in den biomedizinischen Bereichen in kurzer Form zusammengefasst.

Diagnostik

Diagnosechips für Krankheiten und genetische Dispositionen werden von verschiedenen Start-up-Unternehmen entwickelt. Die Nanotechnologie kann bei der Optimierung dieser Biochips helfen. Mit solchen Diagnosechips lassen sich Tausende von Genen gleichzeitig untersuchen. Dazu werden im Labor hergestellte Gen-Stücke mit bekannten Eigenschaften auf die Chip-Oberfläche geklebt. Eine Diagnose hängt z. B. davon ab, an welche Gen-Stücke sich die DNA aus dem Blut eines Patienten anlagert. An DNA-Fragmente gekoppelte Nanopartikel z. B. erlauben die Identifikation definierter DNA-Sequenzen. Viren und Zelltypen können aufgrund von Oberflächeneigenschaften identifiziert werden, die sie an bestimmten Nanostrukturen haften lassen.

Eine Nachfrage nach solchen Diagnosechips ist beispielsweise für biomedizinische Analysen zu erwarten, die in jeder Arztpraxis oder auch vom Patienten zu Hause vorgenommen werden können, so etwa bei der regelmäßigen Überwachung der mütterlichen Blutwerte während einer Schwangerschaft. Synergien bestehen mit der Telemedizin: Chronischkranke oder Risikopatienten können mithilfe implantierter Sensoren im Nanomaßstab überwacht werden. Interesse an Verfahren, die mit sehr geringen Probenmengen auskommen, ist auch im Bereich der Kriminaltechnik vorhanden.

In der Forschung besteht Bedarf an Sensoren, die das Verhalten von Biomolekülen und Zellorganellen in vivo verfolgen können. Kleinste Sensoren, die in biologische Organismen eingepflanzt werden, könnten Auskunft über äußere Belastungen und den physiologischen Zustand des Organismus geben. Kleine Sensoren, die frühe Anzeichen einer Erkrankung, z. B. Krebs oder Herzinfarkt, erkennen, verfügen ebenfalls über ein hohes Marktpotenzial.

Im Bereich der Arbeits- und Umweltmedizin besteht Bedarf an kleinen Biosensoren, die Schadstoffbelastungen an verschiedensten Orten differenziert messen können bzw. herkömmliche Produkte an Empfindlichkeit und Vielfalt der detektierbaren Substanzen übertreffen. Nanobiosysteme erlauben es, solche Verbesserungen zu erzielen.

Wirkstoffe

Es besteht ein erheblicher Bedarf an Vehikeln, die biologische Wirkstoffe – vor allem Medikamente – effizient zu ihrem Ziel transportieren und vielfach auch einen Schutzmantel bilden. Nanopartikel können aufgrund ihrer Größe biologische Barrieren, wie z. B. Zellmembranen, verhältnismäßig leicht durchdringen und stellen daher geeignete Transportsysteme für Wirkstoffmoleküle dar. Nanopartikel lassen sich nicht nur zum Transport und Schutz biologischer Wirkstoffe einsetzen, sondern sind auch geeignet, solche Wirkstoffe über Zeiträume bis zu mehreren Monaten dosiert freizusetzen. Insbesondere wird an Vehikeln gearbeitet, die in der Lage sind, auf körpereigene Signale zu reagieren. In der Medizin besteht großer Bedarf an Dosiersystemen, die bioaktive Wirkstoffe solchermaßen kontrolliert abgeben, für Patienten und Behandelnde gut zu handhaben sind und ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis aufweisen. Zurzeit werden solche biologischen Dosiersysteme entwickelt. Schilddrüsenzellen oder Inselzellen der Bauchspeicheldrüse beispielsweise werden heute bereits in teildurchlässige Hüllen verkapselt implantiert. Im Körper der so behandelten Patienten produzieren sie die zuvor fehlenden Hormone.

Eine wesentliche Ergänzung bzw. Verbesserung dieser Therapieansätze könnten so genannte nanobasierte Mikropumpen darstellen. Ende 2004 soll eine kleine und für Patienten komfortable Mikropumpe auf den Markt gelangen, die Insulin verabreicht. Die Verbindung dieser Pumpe mit einem Biochip, der kontinuierlich den Blutzuckerspiegel überwacht, wird geprüft. Intensiv wird zudem auch an implantierbaren Chemotherapiesystemen im Nanomaßstab geforscht.

Verfahren, Materialien und Instrumente

An der Erforschung und Entwicklung von biomedizinischen Nanomaschinen wird international gearbeitet. Aktuell wird unter anderem an Motoren geforscht, die aus DNA-Molekülen sowie aus Aktin und Myosin bestehen. Bisher handelt es sich dabei überwiegend noch um reine Grundlagenforschung. Als in absehbarer Zeit realisierbare Nanomaschinen werden sehr kleine, bewegliche Endoskope eingestuft, die mit zusätzlichen Instrumenten, z. B. Greifarmen im Nanomaßstab, ausgestattet werden könnten. Für solche Geräte ist eine starke Nachfrage abzusehen.

Ein weiteres aktuelles Anwendungsfeld stellt auch die magnetfeldinduzierte Behandlung mit Wärme dar. In der Berliner Charité wird hierzu derzeit ein Projekt zur Zerstörung von Tumorzellen mithilfe magnetischer Nanopartikel durchgeführt. Bei einem weiteren Verfahren, an dem zurzeit geforscht wird, werden Nanostrukturen, die selektiv an Krebszellen binden, mit Radionukliden befrachtet. Tumorzellen sollen dadurch zerstört werden, ohne dass das umliegende Gewebe erheblichen Schaden erleidet.

Mithilfe der Nanotechnologie lassen sich Beschichtungen für medizinische Geräte herstellen, die antimikrobiell wirken, kaum verschmutzen oder leicht zu reinigen sind und Korrosion bei der Sterilisation oder Desinfektion verhindern. Mittelfristig können Nanomaterialien als Transplantate, z. B. als „künstliche Haut", zum Einsatz kommen oder den Aufbau solcher Transplantate aus Zellkulturen unterstützen. Auch Synergien zwischen Stammzelltherapie und Nanotechnologie sind denkbar, indem Nanotechnikmaterialien ein Gerüst bilden, das den Aufbau neuen Gewebes mithilfe von Stammzellen ermöglicht. Durch Verfahren der Nanotechnologie könnte die Biokompatibilität künstlicher Implantate verbessert werden. Zudem wird erwartet, dass Nanoimplantate länger im Körper funktionsfähig bleiben als bisher übliche. Ein weiteres Entwicklungsgebiet stellen nanoelektronische Neuroimplantate dar, die Schäden an Sinnesorganen oder am Nervensystem kompensieren bzw. die Leistungsfähigkeit dieser Organe erhöhen. International wird bereits intensiv an Mikroimplantaten gearbeitet, die insbesondere die Funktionsfähigkeit von Sehsinn und Gehör wieder herstellen sollen.

Weitere Anwendungen der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften

Mithilfe der Nanobiotechnologie könnten die Qualität von Lebensmitteln verbessert, die Bioverfügbarkeit von wichtigen Inhaltsstoffen erhöht sowie optische Eigenschaften, Geschmack und Konsistenz verändert werden. Es sind nanotechnologisch optimierte Herstellungsverfahren und Verpackungsmaterialien im Gespräch, die den Zustand der verpackten Lebensmittel überwachen und beispielsweise eine Warnung zeigen, wenn die Kühlkette unterbrochen wurde oder ein Nahrungsmittel verdorben ist. Nachfrage ist auch bei geeigneten nanoanalytischen Verfahren zu erwarten. So werden beispielsweise nanoanalytische Methoden unter Verwendung von DNA-Chips für die Untersuchung von Lebensmitteln auf gentechnisch veränderte Bestandteile entwickelt.

Mithilfe der Nanotechnologie werden im Bereich der Kosmetik vor allem bestehende Produkte weiter entwickelt. Eine wichtige Funktion in der Kosmetik übernehmen Vehikel, die Wirkstoffe (z. B. Vitamine oder UV-Filter) zu ihrem Wirkungsort, etwa in tiefere Hautschichten, transportieren. Wirkstoffe sollen mithilfe von Nanopartikeln besser auf und in der Haut verteilt und effektiver abgegeben werden. Titan- oder Zinkoxidpartikel im Nanomaßstab werden beispielsweise in Sonnenschutzmitteln eingesetzt. Sonnenschutzprodukte mit Nanopartikeln zeigen nach heutigem Kenntnisstand höhere Wirksamkeit und bessere Hautverträglichkeit als konventionelle Produkte. Es ist daher zu erwarten, dass Nanopartikel künftig zunehmend in Kosmetika eingesetzt werden.

Visionen

Nanotechnologie ist ein hochgradig visionäres Thema. Sowohl Langfrist-Visionen mit einem Zeithorizont von mehr als 15 Jahren als auch kurzfristigere Visionen, die besonders im Umfeld der US-amerikanischen „National Nanotechnology Initiative (NNI)" entwickelt werden, prägen im Guten wie im Schlechten das Bild der Technologie in der interessierten Öffentlichkeit.

Zu unterscheiden sind zumindest zwei visionäre Diskurse: zum einen der in Forschungspolitik, Wissenschaft und Wirtschaft stattfindende Diskurs über die Potenziale der Nanotechnologie, in dem es vor allem um relativ realistisch anmutende, kurzfristige Visionen geht, zum anderen der stark futuristische – und überwiegend sehr optimistische – Diskurs im Umfeld des von K. Eric Drexler gegründeten „Foresight Institute". Dessen Grundannahmen zur zukünftigen Entwicklung werden auch von futuristischen Pessimisten wie Bill Joy geteilt.

Die Visionen Drexlers, Joys und anderer extremer Futuristen – aber auch einige der im Umfeld der „NNI" entwickelten – beruhen zum großen Teil auf Annahmen zum zukünftigen Zusammenwirken mehrerer neuer Technologien. Gerade durch solche Visionen zur Konvergenz verschiedener Technologien werden Hoffnungen auf umfassende und tiefgreifende Veränderungen der Bedingungen menschlicher Existenz beflügelt.

Der technologische Futurismus malt eine Zukunft aus, in der alte Menschheitsträume (Überwindung von Armut, Mangel, Tod etc.) wahr werden. Pessimistische Futuristen warnen jedoch vor möglichen großen Gefahren. Eine besonders bedrohliche Vision ist dabei die Vorstellung einer Vernichtung allen Lebens auf der Erde durch selbstreplizierende Nanoroboter („gray goo problem"). Diese bereits in den 80er-Jahren von Drexler popularisierte Zukunftstechnologie spielt auch in Visionen einer zukünftigen Welt allgemeinen Wohlstands eine zentrale Rolle. Viele Wissenschaftler betrachten solche Visionen zu selbstreplizierenden Nanorobotern mit großer Skepsis. Die Skepsis gegenüber dem Futurismus von Autoren wie Drexler, Joy und Ray Kurzweil sollte aber nicht den Blick darauf verstellen, dass auch im Umfeld der „NNI" eine Reihe sehr weit reichender optimistischer Visionen entwickelt wurde.

Die Begeisterung, die optimistische futuristische Visionen wecken können, wird in den USA bewusst als Mittel zur Förderung der Technologieentwicklung eingesetzt. Eine solche Strategie des „hope and hype" ist aber immer eine Gratwanderung. Neben positiven Effekten dieser Strategie (wie z. B. Anreize für den wissenschaftlichen Nachwuchs oder das Wecken sowie Wachhalten von politischem und wirtschaftlichem Interesse) sind auch negative Konsequenzen denkbar: So besteht zum einen die Gefahr, dass die Erwartungen an Nanotechnologie zu

hoch geschraubt und Enttäuschungen dadurch unvermeidlich werden. Zum anderen kann unbeabsichtigter Weise auch die Kehrseite des optimistischen Futurismus – ein mit Weltuntergangsängsten und Schreckensvisionen verbundener pessimistischer Futurismus – popularisiert werden.

Eine kritische Auseinandersetzung mit den Schreckensvisionen, selbst wenn sie deren Popularität zunächst noch vergrößerte, wäre ein wichtiger Beitrag zu einer rationalen, problemadäquaten Diskussion über Chancen und Risiken der Nanotechnologie. Problematisch ist allerdings, dass eine solche Auseinandersetzung intellektuelle und materielle Ressourcen binden würde, die dann möglicherweise bei der Einschätzung dringlicher erscheinender Probleme der Technikfolgenabschätzung im Bereich Nanotechnologie (wie z. B. den Auswirkungen gesundheitlicher und ökologischer Auswirkungen von Nanopartikeln oder den ethischen Konsequenzen nanotechnologischer Anwendungen in der Medizin) fehlen.

Chancen und Risiken der Nanotechnologie

Wirtschaftliche Aspekte

Mit der Nanotechnologie verbindet sich die Hoffnung auf bedeutende Umsatzpotenziale in fast allen Branchen der Wirtschaft. Zwar steckt die Marktdurchdringung von nanotechnologischen Verfahren und Produkten noch ziemlich in den Anfängen, jedoch hat eine Reihe von Produkten und Verfahren bereits den Weg in den Markt gefunden.

Der Einfluss nanotechnologischer Erkenntnisse auf verkaufbare Produkte besteht schon seit Jahren in den Bereichen Elektronikherstellung, Datenspeicherung, funktionelle Schichten oder Präzisionsoptiken. In den letzten Jahren sind nanotechnologische Erkenntnisse zunehmend auch in die Felder Biologie, Chemie, Pharmazie und Medizin eingeflossen, und dieser Trend wird voraussichtlich weiter anhalten. Bereits heute sind deutliche Einflüsse nanotechnologischer Erkenntnisse auf Milliardenmärkte bei der Pharmakaherstellung, medizinischen Diagnostik, Analytik oder bei chemischen und biologischen Katalysatoroberflächen zu erkennen.

Zu unterscheiden sind die direkten Umsätze mit Nanokomponenten und die Umsätze mit Produkten, in denen Nanotechnologien inkorporiert sind. Das Datenmaterial zur wirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie ist allerdings – nicht nur in Deutschland – noch sehr lückenhaft, eine allgemein anerkannte breite Datenbasis liegt bisher noch nicht vor.

Eine Studie des Bankhauses Sal. Oppenheim jr & Cie. stellt fest, dass letztlich die Hebelwirkung der neuen Technologie als entscheidend für das Marktvolumen anzusehen ist. Wesentlich seien nicht der direkte Umsatz und die Gewinne, die mit Nanotechnologieprodukten selbst erzielt würden, sondern die vielfältigen Auswirkungen der Technologie in verschiedensten Anwendungsbereichen. Unternehmen, die sich auf Nanotechnologie konzentrieren, seien gezwungen, den schwierigen Übergang von der wissenschaftlichen Forschung zum Massengeschäft zu meistern. Als hilfreich werde sich dabei oft die Entwicklung strategischer Partnerschaften erweisen.

Positive Folgen für Gesundheit und Umwelt

Für die Bereiche Gesundheit und Umwelt werden durch den Einsatz von Nanotechnologien deutliche Entlastungseffekte vermutet bzw. erhofft. Zu den positiven Folgen nanotechnologischer Entwicklungen für die Gesundheit zählen u. a. die Entwicklung neuer Diagnose- und Therapieverfahren, erhebliche Erkenntnisfortschritte in den Biowissenschaften und im Verständnis biologischer Prozesse, die Entwicklung neuer und die Optimierung bekannter Medikamente und Agrochemikalien.

Mithilfe nanotechnologiebasierter Diagnoseinstrumente können möglicherweise Krankheiten oder Dispositionen für Krankheiten früher als bisher erkannt werden. Durch die Entwicklung der Lab-on-a-Chip-Technologie wird die sich abzeichnende Tendenz hin zu einer individualisierten Medizin weiter gefördert. Bei der Therapie besteht Aussicht, mithilfe der Nanotechnologie gezielte und nebenwirkungsfreie Behandlungen zu entwickeln. Die breite Anwendung nanopartikulärer Dosiersysteme könnte zu Fortschritten bei der medikamentösen Behandlung führen. Durch Verfahren der Nanotechnologie kann die Biokompatibilität künstlicher Implantate verbessert werden. Relativierend ist anzumerken, dass mit wenigen Ausnahmen die positiven Auswirkungen von Nanotechnologie auf die menschliche Gesundheit jedoch bisher überwiegend hypothetisch sind.

Entlastungseffekte für die Umwelt können sich durch die Einsparung von stofflichen Ressourcen, die Verringerung des Anfalls von umweltbelastenden Nebenprodukten, die Verbesserung der Effizienz bei der Energieumwandlung, die Verringerung des Energieverbrauchs und die Entfernung umweltbelastender Stoffe aus der Umwelt ergeben.

Mögliche negative Folgen für Gesundheit und Umwelt

Einen Schwerpunkt dieser Diskussion bildet die Frage nach den Auswirkungen einer unkontrollierten Freisetzung von Nanopartikeln. Zum Stand der Forschung über die Gesundheits- und Umweltrelevanz der Nanotechnologien ist derzeit generell festzustellen, dass die vorliegenden Untersuchungsergebnisse hinsichtlich ihrer Belastbarkeit begrenzt sind. Vermutungen über mögliche negative Folgen der Inhalation von Nanopartikeln basieren bisher im Wesentlichen auf Analogieschlüssen zu Ergebnissen vorliegender Untersuchungen über die Wirkungen ultrafeiner Partikel.

Ultrafeine Partikel können nachweislich chemische Reaktionen im Körper katalysieren. Die Aufnahme ultrafeiner Partikel in Zellen kann Reaktionen des Immunsystems auslösen. In vielen Anwendungsbereichen der Nanotechnologie treten Nanotubes auf, die als lungengängige Fasern möglicherweise ähnliche gesundheitliche Folgen nach sich ziehen könnten wie Asbestfasern. Nanopartikel können Zellmembranen verhältnismäßig leicht durchdringen und damit neben dem erwünschten auch zu einem unerwünschten Transport von Wirkstoffen über biologische

Barrieren führen. Die Pharmakokinetik von Wirkstoffen, die mit Nanopartikeln verabreicht werden, ist heute erst ansatzweise bekannt.

Über Lebensmittel und Kosmetika kommt der menschliche Körper bereits heute vielfach mit Nanopartikeln in Kontakt (z. B. Farbstoffe, UV-Filter), wobei die Grenzen zwischen Medikamenten und Kosmetika zunehmend unscharf werden. Darüber hinaus verändern Fortschritte in der Kosmetik die gesellschaftlichen Ansprüche an das Erscheinungsbild und die körperliche „Perfektion“ von Menschen weiter.

Künstliche Nanostrukturen können z. B. durch Emissionen der Nanoindustrie oder durch Entstehung von Nanopartikeln beim alltäglichen Gebrauch von Nanoprodukten in die Umwelt gelangen. Ihr Ausbreitungsverhalten und ihre Auswirkungen auf die Umwelt, insbesondere potenzielle Langzeitfolgen, sind bisher kaum bekannt. Hier ist insbesondere auf solche Stoffe zu verweisen, die in der natürlichen Umwelt nicht vorkommen, wie Fullerene oder Nanotubes, die als neuartige Materialien einzustufen sind.

Zudem sind unterschiedliche Wirkungen auf die jeweiligen Umweltmedien zu erwarten. In der Luftreinhaltung stützt man sich derzeit auf Aussagen zu ultrafeinen Partikeln, die aus Emissionen des Verkehrs stammen. In Bezug auf Wasser wird von einer hohen Beweglichkeit der Nanopartikel ausgegangen. Abwässer aus Bergwerken beispielsweise enthalten eine vergleichsweise hohe Konzentration an Schwermetallen; Nanopartikel könnten diese Schwermetalle in Fließgewässer verschleppen.

Ethische und gesellschaftliche Aspekte

Bisher wird Nanotechnologie in praktischer Philosophie und Ethik kaum thematisiert, mögliche gesellschaftliche Folgen ihres verstärkten Einsatzes werden eher selten erforscht. In Forschungspolitik und Wissenschaft besteht jedoch Einigkeit darüber, dass hier mehr Forschungsprojekte, sonstige wissenschaftliche Aktivitäten und forschungspolitische Anstrengungen vonnöten sind. Schon jetzt lassen sich einige grundsätzliche Überlegungen zu ethischen Problemen sowie zu möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie auf ausgesuchte gesellschaftliche Bereiche anstellen.

In Visionen zur Nanotechnologie tauchen immer wieder Aspekte auf, die die Grenze zwischen dem verwischen, was Menschen sind, und dem, was sie mithilfe technischer Errungenschaften und Anwendungen erschaffen. Solche Aspekte betreffen z. B. die Durchdringung und Veränderung des menschlichen Körpers durch Versuche, seine biologischen Bestandteile durch nanotechnische zu ergänzen bzw. zu ersetzen und ihn mit externen Maschinen oder anderen Körpern bzw. Körperteilen zu vernetzen. Derartige Vorstellungen, aber auch weitere Visionen zur Nanotechnologie, ähneln Visionen zu anderen neuen Technologienentwicklungen oder beziehen sich sogar direkt auf diese. Durch die sich abzeichnende Konvergenz verschiedener Technologien werden nicht nur Hoffnungen auf technische Fortschritte, sondern auch Bedenken in Bezug auf deren Folgen verstärkt. Die weitere Entwicklung der Nanotechnologie sollte daher flankiert werden von kontinuierlicher Forschung zu ethischen und politischen Fragen, die das sich wandelnde Verhältnis von Mensch und Maschine sowie von Natur und Technik betreffen.

Probleme der Verteilung und der gerechten Nutzung der Früchte technischen Fortschritts sind weitere wahrscheinliche gesellschaftliche Folgen des Einsatzes von Nanotechnologie. Sie sind hinsichtlich des politischen Handlungsbedarfs von besonderem Interesse. Fragen der Chancenverteilung könnten zumindest in zweierlei Hinsicht dringlich werden: zum einen innerhalb technisch weit entwickelter Gesellschaften, zum anderen mit Blick auf weniger entwickelte Gesellschaften. Befürchtungen in Bezug auf diese beiden Formen eines möglichen „Nano-divide“ basieren auf der Annahme, dass Nanotechnologie sowohl zu neuen und erweiterten Optionen individueller Selbstbestimmung (z. B. im gesundheitlichen Bereich) als auch zu erheblichen Verbesserungen der Wettbewerbsfähigkeit von Volkswirtschaften beitragen kann. Politische Maßnahmen können Chancengleichheit und eine nachhaltige globale Entwicklung fördern. Weitere politische Aufgaben stellen sich in Bezug auf Schadensvermeidung, z. B. hinsichtlich denkbarer negativer Konsequenzen neuer medizinischer Diagnose- und Überwachungsmöglichkeiten für den Patientendatenschutz.

Ein weiteres Feld, in dem durch Nanotechnologie erhebliche Fortschritte erwartet werden, sind militärische Anwendungen. Zudem könnte ein „Nano-divide“ zwischen weit und weniger weit entwickelten Staaten sicherheitspolitisch problematische Folgen nach sich ziehen. Die weitere Entwicklung der Nanotechnologie dürfte daher auch erhöhten sicherheitspolitischen Handlungsbedarf mit sich bringen. Zudem besteht (vor allem – aber nicht nur – in den USA) ein erhebliches Interesse an militärischen Nanotechnologieanwendungen. Obwohl einige der in der wissenschaftlichen Diskussion auftauchenden möglichen Sicherheitsprobleme (wie z. B. durch selbstreplizierende Nanoroboter) wenig dringlich erscheinen, dürften – bei weiteren Fortschritten der nanotechnologischen militärischen Forschung und Entwicklung – Forderungen nach sicherheits- und rüstungskontrollpolitischen Maßnahmen in Zukunft häufiger gestellt werden.

Handlungsbedarf

Die Voraussetzungen für die erfolgreiche Weiterentwicklung der Nanotechnologie und die breite wirtschaftliche und gesellschaftliche Nutzung ihrer Potenziale müssen geschaffen bzw. verbessert werden. Hieraus resultiert vielfältiger Klärungs- und Handlungsbedarf. Da sich die Nanotechnologie – insgesamt gesehen – noch in einem relativ frühen Stadium der Entwicklung befindet, kommt den Anforderungen an staatliches Handeln besondere Bedeutung zu.

Die Nanotechnologie muss in der öffentlichen Forschungsförderung ein prioritärer Bereich bleiben, damit die deutsche Forschung ihre derzeit starke internationale

Position im Bereich der Nanotechnologie behaupten kann. Das Anwendungspotenzial und der ökonomische und gesellschaftliche Nutzen sollten als Beurteilungskriterien für öffentliche Förderung stärkeres Gewicht erhalten. Die Kompetenzzentren Nanotechnologie könnten eine aktivere und erweiterte Rolle bei der Umsetzung von Ergebnissen nanotechnologischer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten spielen.

Der Stand der Forschung über die potenziellen Umwelt- und Gesundheitswirkungen der Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Verfahren und Produkte ist unbefriedigend. Erhebliche verstärkte Forschungsanstrengungen sind hier dringend erforderlich, da sich aus dem fehlenden Wissen um die Umwelt- und Gesundheitsfolgen Hemmnisse für die Markteinführung von Nanotechnologien ergeben könnten.

Forschung zu gesellschaftlichen und ethischen Aspekten der Entwicklung und verbreiteten Anwendung der Nanotechnologie sollte bereits jetzt initiiert werden. Fragen des Datenschutzes (insbesondere im medizinischen Bereich) und des Schutzes der Privatsphäre sollten regelmäßig hinsichtlich relevanter nanotechnologischer Neuentwicklungen wissenschaftlich untersucht und öffentlich diskutiert werden.

Die umfassende Information der Öffentlichkeit ist Voraussetzung einer rationalen gesellschaftlichen Auseinandersetzung mit der Nanotechnologie. Anzustreben wäre eine zentrale Informationsstelle für die breite Öffentlichkeit zum Thema Nanotechnologie. Dabei könnte auf die Informationsangebote der einzelnen Kompetenzzentren und auf andere nationale, europäische und außereuropäische Informationsportale zurückgegriffen werden.

Aus den Fortschritten in der Nanotechnologie – und aus der zunehmenden Konvergenz verschiedener Technologie- und Forschungsbereiche – entstehen neue Anforderungen an die Bildungspolitik. Interdisziplinäre Ansätze in Ausbildung und Nachwuchsförderung in der Nanotechnologie und verwandten Technologiebereichen müssen kontinuierlich und verstärkt gefördert werden. Sozial- und geisteswissenschaftliche Technikforschung sollte dabei mehr als bisher einbezogen werden. Der nanotechnologische Qualifizierungsbedarf verschiedener Berufsgruppen ist vertieft zu untersuchen und gegebenenfalls durch geeignete Qualifizierungsangebote abzudecken.

Politische Entscheidungen über die Notwendigkeit nanotechnologiespezifischer Regulierungen werden in absehbarer Zeit getroffen werden müssen. Für solche Entscheidungen sind die sachlichen Grundlagen zu schaffen. Dazu gehört – neben einer wesentlich verbesserten Datenbasis zu den Auswirkungen nanotechnologischer Verfahren und Produkte auf Umwelt und menschliche Gesundheit – eine systematische und umfassende Analyse des derzeitigen für Anwendungen der Nanotechnologie relevanten Rechtsrahmens. Die Einrichtung eines den weiteren Anwendungsprozess der Nanotechnologie begleitenden entscheidungsunterstützenden Monitoring-Programms sollte erwogen werden.

I. Einleitung

Nanotechnologie ist ein Sammelbegriff für eine weite Palette von Technologien, die sich mit Strukturen und Prozessen auf der Nanometerskala befassen. Sie gilt als Schlüsseltechnologie, von der Anstöße zu innovativen Entwicklungen in den verschiedensten technologischen Bereichen und gesellschaftlichen Anwendungsfeldern erwartet werden. Hiermit verbindet sich die Hoffnung auf bedeutende Umsatzpotenziale in vielen Bereichen der Wirtschaft, aber auch auf Entlastungseffekte für die Umwelt und auf positive Auswirkungen im Bereich der menschlichen Gesundheit. Andererseits mehren sich die kritischen Stimmen, die auf mögliche negative Folgen für Umwelt und Gesundheit und mit dem Einsatz der Nanotechnologie verbundene ethische Probleme aufmerksam machen.

Der Prozess der Umsetzung nanotechnologischer Forschungs- und Entwicklungsergebnisse beschleunigt sich. Es finden sich immer mehr Beispiele bereits realisierter Anwendungen in wichtigen Industriebranchen. Eine Fülle von Anwendungsideen sind im Stadium der Entwicklung oder Erprobung und werden mittelfristig realisiert werden können. Es ist aber festzustellen, dass die Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Öffentlichkeit weniger von konkreten Anwendungen dieser Technologien und von realistisch erscheinenden Anwendungsideen geprägt wird als von utopisch anmutenden visionären Diskursen, in denen Horrorvisionen (wie z. B. die Vernichtung allen Lebens auf der Erde durch selbstreplizierende Nanoroboter) mit Zukunftsvorstellungen eines mithilfe der Nanotechnologie wahr werdenden „goldenen Zeitalters“ konkurrieren. Damit wird oft der Blick darauf verstellt, was im Bereich der Nanotechnologie tatsächlich erforscht und entwickelt wird.

Angesichts der enormen Chancen, die dieser Schlüsseltechnologie für die zukünftige wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung zugeschrieben werden, und der andererseits bestehenden Unsicherheiten über ihre Nutzungsperspektiven und die mit ihrem Einsatz möglicherweise verbundenen Risiken hat der Bundestagsausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung das TAB beauftragt, eine umfassende Untersuchung zu „Stand und Perspektiven der Nanotechnologie“ durchzuführen. Das TAB hat in dieser Untersuchung bewusst nicht die utopisch-visionären Vorstellungen über zukünftige Nutzungsmöglichkeiten der Nanotechnologie in den Vordergrund gestellt. Den Schwerpunkt bilden vielmehr die vielfältigen konkreten Anwendungen und Anwendungsideen in den verschiedensten Bereichen.

Nach einer kurz gehaltenen Diskussion von Begriffen, Abgrenzungsproblemen, strategischen Ansätzen und grundlegenden Aktivitätsfeldern der Nanotechnologie in Kapitel II des Berichts und einer international vergleichenden Analyse der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Nanotechnologie anhand von bibliometrischen Daten und Patentindikatoren in Kapitel III wird in den folgenden vier Kapiteln der Blick auf die Anwendungen der Nanotechnologie gerichtet. Kapitel IV bietet zunächst einen breiten Überblick über alle

zentralen Anwendungsfelder. Dieser Überblick wird in den Kapiteln V bis VII ergänzt und vertieft: In Kapitel V werden Anwendungen und zukünftige Anwendungspotenziale der Nanotechnologie in wichtigen Wirtschaftsbranchen dargestellt, wobei der Schwerpunkt auf der Automobilindustrie liegt; in den Kapiteln VI und VII werden die Bereiche „Informations- und Kommunikationstechnik" und „Lebenswissenschaften" vertiefend analysiert.

In Kapitel VIII wird dann auf Visionen zur Nanotechnologie eingegangen; dabei geht es sowohl um relativ realistisch anmutende, eher kurzfristige Visionen als auch um solche, die stark futuristischen Charakter haben. In Kapitel IX wird der Stand der Diskussion zu Chancen und Risiken der Nanotechnologie dargestellt, wobei Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt sowie ethische Probleme im Vordergrund stehen.

Das abschließende Kapitel X enthält Überlegungen zum Klärungs- und Handlungsbedarf, wie sie sich aus der Untersuchung des TAB ergeben.

Das Feld der Nanotechnologie zeichnet sich durch ausgeprägte Heterogenität aus. Dies gilt für die zu berücksichtigenden Technologien selbst als auch für die (potenziellen) Anwendungen und die Zeithorizonte ihrer Realisierung. Insgesamt gesehen befindet sich die Nanotechnologie noch in einem frühen Stadium der Entwicklung. In solchen Situationen können Technikfolgenabschätzungen sinnvoll nur als „begleitende Prozesse" aufgefasst und konzipiert werden. Das Projekt des TAB, über das hier berichtet wird, versteht sich daher als Teil eines die Weiterentwicklungen und vielseitigen Anwendungen der Nanotechnologie begleitenden Prozesses.

Der vorliegende Bericht basiert in weiten Teilen auf Gutachten, die vom VDI-Technologiezentrum/Zukünftige Technologien Consulting, Düsseldorf, vom Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen, Euskirchen, von der Basler & Hofmann Ingenieure und Planer AG, Zürich, vom Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, und vom Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH, Berlin, für das TAB erstellt wurden. Das TAB dankt allen am Projekt beteiligten Gutachtern für ihre Bereitschaft zur Diskussion von konzeptionellen Fragen und Zwischenergebnissen während der Durchführungsphase des Projekts und für die sorgfältige Abfassung ihrer Endberichte.

II. Begriffe und Grundlagen

1. Was ist Nanotechnologie?

Nanotechnologie ist ein Sammelbegriff für eine weite Palette von Technologien, die vor allem eines gemeinsam haben: Sie befassen sich mit Strukturen und Prozessen auf der Nanometerskala. Ein Nanometer ist ein Milliardstel Meter (10^{-9} m) und bezeichnet einen Grenzbereich, in dem das Verhalten von Materie nicht mehr nur mit den Gesetzen der klassischen Physik beschrieben werden kann, sondern in dem mehr und mehr quantenphysikalische Effekte eine wichtige Rolle spielen.

Die Leitvision der Nanotechnologie, die gezielte Manipulation von Materie auf atomarer Ebene, formulierte bereits im Jahr 1959 der amerikanische Physik-Nobelpreisträger Richard P. Feynman.

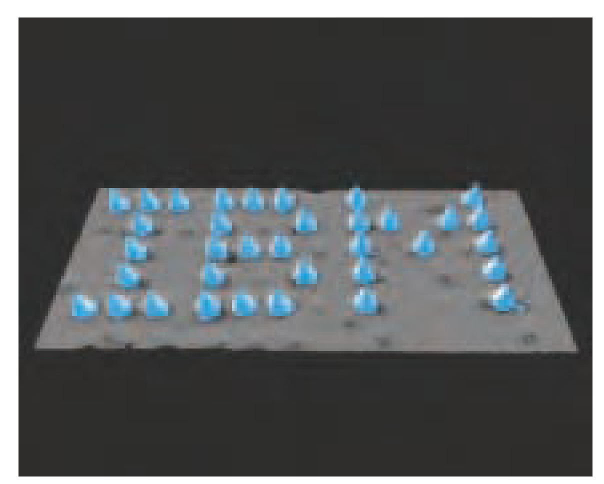
Leitvision der Nanotechnologie:

„But I am not afraid to consider the final question as to whether, ultimately – in the great future – we can arrange the atoms the way we want; the very atoms, all the way down! What would happen if we could arrange the atoms one by one the way we want them […]. What would the properties of materials be if we could really arrange the atoms the way we want them? […] Atoms on a small scale behave like nothing on a large scale, for they satisfy the laws of quantum mechanics. […] At the atomic level, we have new kinds of forces and new kinds of possibilities, new kinds of effects. The problems of manufacture and reproduction of materials will be quite different. […] The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom. It is not an attempt to violate any laws; it is something, in principle, that can be done; but in practice, it has not been done because we are too big." (Feynman 1959)

Im Jahr 1990 gelang Wissenschaftlern von IBM die spektakuläre Realisierung dieser Vision, indem sie mit 35 einzelnen Atomen das IBM-Logo auf eine Einkristall-Oberfläche „schrieben" (Abbildung 1).

Abbildung 1

Schriftzug aus 35 Xenon-Atomen auf einer Nickel-Einkristall-Oberfläche



Quelle: Eigler/Schweizer 1990

Inzwischen hat sich die Nanotechnologie von der reinen Grundlagenforschung weiterentwickelt und findet sich zunehmend in diversen technischen Anwendungsberei-

chen. Beispielsweise ermöglichen nanometerdicke Schichten in den Leseköpfen von Computer-Festplatten Speicherkapazitäten im Gigabyte-Bereich oder werden Titandioxid-Nanopartikel in Sonnenschutzcremes als UV-Filter eingesetzt. Zukünftig werden von der Nanotechnologie in vielen Bereichen tiefgreifende Auswirkungen und Innovationen erwartet, so z. B. in der Informations- und Kommunikationstechnologie, Energie-, Produktions- und Umwelttechnik sowie in der Chemie, Medizin, Pharmazie und Kosmetik.

Viele inkrementelle Fortschritte bei bekannten Produkten und Technologien, aber auch neuartige Produkt- und Prozessinnovationen, beruhen auf Nanotechnologie bezogenen Materialien oder Verfahren, ohne dass der Nanotechnologiebezug auf den ersten Blick erkennbar ist. Die Nanotechnologie fungiert vielmehr als „enabling technology“, die aufgrund neuartiger Effekte und Materialeigenschaften diese Innovationen erst ermöglicht.

1.1 Abgrenzung des Feldes, Definition

Eine allgemein anerkannte Definition der Nanotechnologie existiert bis heute nicht. Vielmehr gibt es mehrere Definitionen (v. a. von Wissenschaftlern, Wissenschaftsorganisationen und Politikberatern), die sich z. T. deutlich voneinander unterscheiden.

Dies liegt zum einen daran, dass es sich bei der Nanotechnologie nicht im engeren Sinne um eine spezifische Technologie oder eine klar umgrenzte Gruppe von Technologien handelt, sondern um ein breites, höchst heterogenes Technologiefeld. Zum anderen gestaltet sich die Abgrenzung zu verwandten oder benachbarten Gebieten wie z. B. der Mikroelektronik, der Chemie oder der Biotechnologie schwierig. So beschäftigt sich z. B. die Biotechnologie seit langem mit nanometergroßen Strukturen, ohne deshalb per se zur Nanotechnologie zu gehören.

Eine klare Abgrenzung ist auch deshalb schwierig, weil Nanotechnologie als neues Forschungsthema der Konvergenz von traditionell getrennten wissenschaftlichen Disziplinen und Technikfeldern entstammt, deren zentrale Entwicklungsrichtungen beim Übergang in den Nanometerbereich zu überlappen und zu verschmelzen beginnen. Wegen der aktuellen forschungspolitischen Konjunktur des Feldes existiert darüber hinaus das Phänomen, dass etliche etablierte Forschungsthemen ihren Nanotechnologiebezug neu entdecken, um damit bessere Chancen auf Fördermittel zu erlangen.

Im vorliegenden Bericht wird folgende Definition der Nanotechnologie verwendet (nach Basler & Hofmann 2002):

1. Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 nm sind.

2. Nanotechnologie macht sich charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer Ebene auftreten.

3. Nanotechnologie bezeichnet die gezielte Herstellung und/oder Manipulation einzelner Nanostrukturen.

Das erste Kriterium charakterisiert den interessierenden Größenbereich; hier gibt es in der Literatur auch strengere Definitionen, etwa: Nanotechnologie befasse sich mit Strukturen, die in mindestens zwei Dimensionen weniger als 100 nm groß sind (Köhler 2001). Diese einschränkendere Definition schließt den gesamten Bereich dünner Schichten bzw. der Beschichtungstechnik aus.

Das zweite Kriterium stellt klar, dass nicht die Geometrie alleine, sondern vor allem die Nutzbarmachung neuer Effekte und Eigenschaften für die Nanotechnologie konstituierend ist. Dies bedeutet z. B., dass die Herstellung und Anwendung von DNA-Chips nicht im engeren Sinn zur Nanotechnologie zählt. Sie wird jedoch im Folgenden dennoch angesprochen, da sie mit verschiedenen Bereichen der Nanotechnologieentwicklung eng vernetzt ist.

Das letzte Kriterium ist vorwiegend für den Bereich der Lebenswissenschaften von Bedeutung. Es scheidet Aktivitäten, die sich natürliche Vorgänge im Nanomaßstab zunutze machen, aus. Dazu zählt beispielsweise die biotechnische Produktion von Enzymen mithilfe von Mikroorganismen. Beobachtende Tätigkeiten dagegen werden zugelassen, sofern sie einzelne Nanostrukturen betreffen.

Insgesamt wird ein pragmatischer Ansatz verfolgt, d. h. auch wenn eine Anwendung der verwendeten Definition nicht streng genügt, kann sie fallweise dennoch behandelt werden, z. B. wenn interessante Verknüpfungen mit dem Kernbereich der Nanotechnologie vorliegen oder klare Perspektiven erkennbar sind, dass die betreffenden Ansätze sich zu originärer Nanotechnologie weiterentwickeln.

1.2 Erwartungen an die Nanotechnologie

Tiefgreifende Innovationen werden von der Nanotechnologie in nahezu allen technischen Anwendungsbereichen erwartet. In der Informations- und Kommunikationstechnologie wird intensiv an neuen Rechnerarchitekturen gearbeitet, die die herkömmliche Silizium-Elektronik ablösen sollen, wenn sie an ihre Grenzen gestoßen ist. Stichworte sind hier DNA-Computing oder Quanten-Computing.

In der Energietechnik kann Nanotechnologie beispielsweise durch neue Materialien für die Photovoltaik, für Wasserstoffspeicher oder für Funktionsmembranen in Brennstoffzellen Impulse auslösen. Neuartige Nanopartikel für hochspezifische Katalysatoren werden gerade entwickelt und könnten Teilbereiche der chemischen Produktionstechnik revolutionieren. In der Medizin sind z. B. Nanopartikel als Wirkstoffträger in der Entwicklung, die die Blut-Hirn-Schranke überwinden können.

Wegen des ausgeprägten Querschnittscharakters der Nanotechnologie und ihres Potenzials zur grundlegenden

Veränderung ganzer Technologiefelder (Systeminnovation) wird die Nanotechnologie als Schlüsseltechnologie angesehen, die in naher Zukunft nicht nur die technologische Entwicklung beeinflussen, sondern auch maßgebliche ökonomische, ökologische und soziale Implikationen mit sich bringen wird. Der Chemie-Nobelpreisträger und Mitentdecker der Fullerene Richard E. Smalley hat die Auswirkungen der Nanotechnologie auf Gesundheit, Wohlstand und Lebensstandard so charakterisiert:

Einschätzung der Auswirkungen der Nanotechnologie:

„The impact of nanotechnology on health, wealth, and the standard of living for people will be at least the equivalent of the combined influences of microelectronics, medical imaging, computer-aided engineering, and man-made polymers in this century.“ (Smalley 1999)

Diese Einschätzung ist zwar teilweise spekulativ, beruht aber auf der Beobachtung und Bewertung konkreter Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

Einen Schritt darüber hinaus gehen verschiedene visionäre Vorstellungen, die insbesondere deshalb von großer Bedeutung sind, weil sie die gegenwärtige öffentliche Wahrnehmung der Nanotechnologie dominieren und sowohl in Fachkreisen als auch im Feuilleton breit diskutiert werden. Ausgangspunkt dieser Visionen ist die Vorstellung, dass es zukünftig gelingt, Materie beliebig zu manipulieren und nach eigenen Wünschen Atom für Atom zusammenzusetzen. Je nach persönlichem Standpunkt können daraus entweder Schreckens- oder Heilsvisionen abgeleitet werden.

Allen voran hat K. Eric Drexler mit seinen Buchpublikationen („Engines of Creation“, 1986; „Unbounding the Future“, 1991) die Diskussion angestoßen und zugleich den Begriff „molekulare Nanotechnologie“ für seine Zukunftsvision von künstlichen, bakterienähnlichen, selbstreplizierenden, „intelligenten“ Nanomaschinen (so genannte „Assembler“) geprägt (vgl. Kapitel VIII). Die Realisierbarkeit dieses Konzeptes ist in der Fachwelt bis heute heftig umstritten, und Drexler und Mitarbeiter werden vielerorts als wissenschaftliche Außenseiter betrachtet. Andererseits hätten die von ihnen vertretenen Ideen – erwiesen sie sich denn als umsetzbar – weit reichende gesellschaftliche Konsequenzen. Die politische und öffentliche Diskussion um Chancen und Risiken der Nanotechnologie ist gegenwärtig davon jedenfalls wesentlich geprägt.

1.3 Grundlegende Strategien

Es gibt zwei grundlegende Strategien, um in die Nanodimension vorzustoßen (Abbildung 2). Auf der einen Seite gibt es den so genannten „Top-down“(=von oben nach unten)-Ansatz, der vor allem in der Physik und physikalischen Technik dominiert. Hier werden von der Mikrotechnik ausgehend Strukturen und Komponenten immer weiter miniaturisiert. Der wichtigste Motor dieses andauernden Trends war und ist die Elektronikindustrie, die immer mehr elektronische Komponenten auf einem Chip unterzubringen und die entsprechenden Strukturen zu verkleinern sucht. Produktionsverfahren, die Strukturen von 100 nm Breite erzeugen können, werden gerade in die Chipindustrie eingeführt. Noch feinere Verfahren sind in der Entwicklung. Die umfangreichen fertigungstechnischen Erfahrungen mit dem Elektronikmaterial Silizium können auch für die Herstellung von mikromechanischen Bauteilen – z. B. Zahnräder, Greifarme u. a. – auf Silizium-Basis genutzt werden.

Auf der anderen Seite steht der „Bottom-up“(=von unten nach oben)-Ansatz. Hier werden immer komplexere Strukturen gezielt aus atomaren bzw. molekularen Bausteinen aufgebaut. Dieser Ansatz wird bislang eher durch die Chemie und Biologie repräsentiert, wo der Umgang mit Objekten in der Nanometerdimension seit langem vertraut ist.

Nicht nur die Konstruktion von größeren, nanoskaligen Molekülaggregaten wie Kolloide, Cluster, supramolekulare Einheiten oder Proteinkomplexe, sondern auch das gezielte Design von Größe, Oberfläche und Form der Nanopartikel sowie deren Funktionalisierung sind das Ziel.

Die Natur nutzt den Bottom-up-Ansatz in großem Stil zum Aufbau von komplexen biologischen Nanostrukturen, z. B. funktionale Biomoleküle, Zellorganellen u. a. Daher kommt das zunehmende Verständnis biologischer Prinzipien und Baupläne und deren Anwendung in technologischen Umgebungen auch der Nanotechnologie zugute (Transfer „Bio2Nano“).

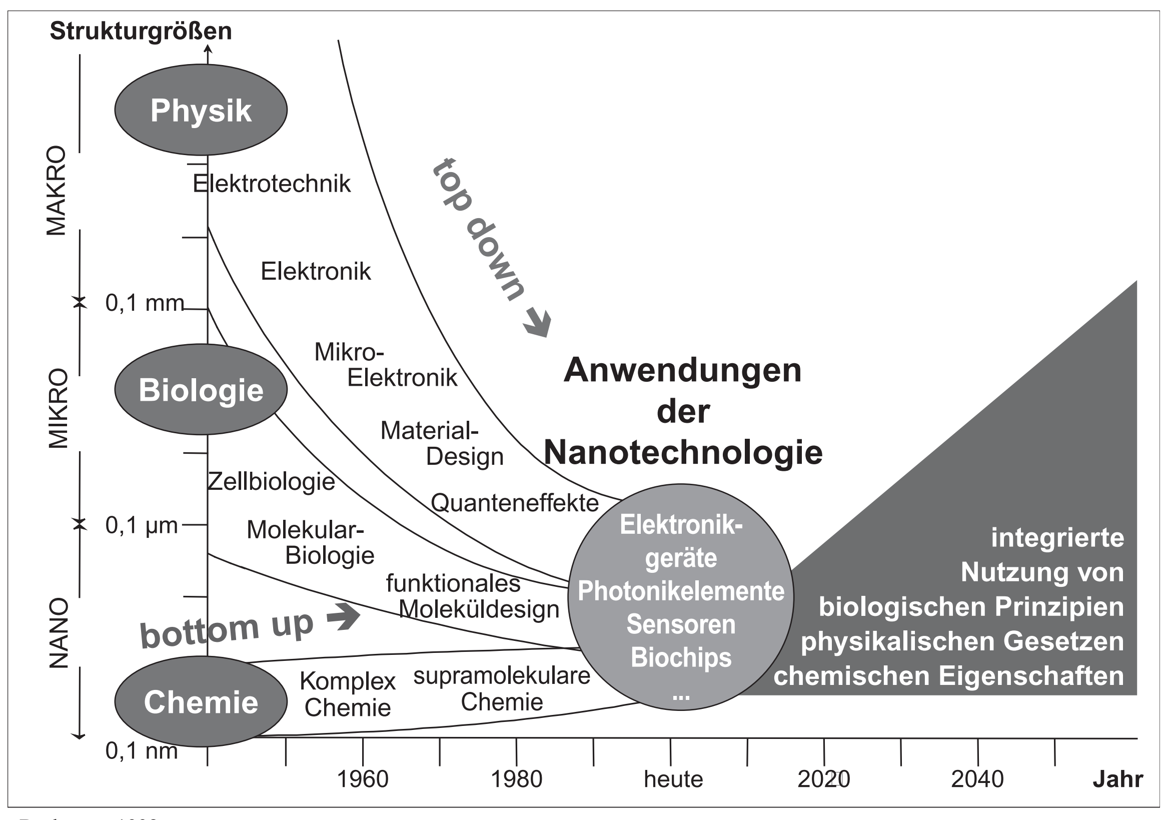
Das bedeutendste Potenzial für Innovationen aus der Nanowelt wird in der Kombination dieser beiden Entwicklungswege, aus deren gegenseitiger Befruchtung und der Nutzung der entstehenden Synergien gesehen. Dabei geht es nicht einfach darum, „Dinge kleiner zu machen“. Vielmehr soll ein Größenbereich dem aktiven und kontrollierten Zugriff geöffnet und technisch nutzbar gemacht werden, in dem neue, bislang unzugängliche Effekte und Eigenschaften auftreten. Dies erfordert innovationsorientierte neue Ansätze, die dem interdisziplinären Charakter dieses Technologiefeldes Rechnung tragen.

1.4 Neuartige Effekte

Während ein makroskopischer Festkörper weitgehend durch die Gesetze der klassischen Physik beschrieben werden kann, findet bei der Verkleinerung auf die Nanometerskala ein Übergang hin zu einem durch die Quantenmechanik beschreibbaren Objekt statt. Außerdem spielen Oberflächen- bzw. Grenzflächeneigenschaften gegenüber den Volumeneigenschaften des Materials eine immer größere Rolle. Einen Überblick über die mit diesem Übergang notwendige Veränderung der Sichtweise gibt Tabelle 1.

Abbildung 2

Generelle Entwicklungstendenzen und Bezug zur Nanotechnologie



Quelle: Bachmann 1998

Tabelle 1

Geänderte Sichtweise beim Übergang zur Nanoskala

Makrowelt	Nanowelt
klassische Physik	Quantenmechanik
Festkörpereigenschaften	Bindungseigenschaften
Volumen dominierend	Oberfläche dominierend
homogene Materialien	inhomogene Materialmischungen
einfache Miniaturisierung	Kombination mit Selbstorganisation
statistische Ansammlungen	individuelle Teilchen

Quelle: nach VDI/FhG-INT 2002

Für ein Nanopartikel heißt das, dass es seine typischen Festkörpereigenschaften verliert und eher als ein großes Molekül betrachtet werden kann. Die elektronischen, chemischen und optischen Eigenschaften des Partikels ändern sich dabei oftmals drastisch mit der Partikelgröße. Dies liegt daran, dass die Elektronen in einem Nanopartikel – wie in einem Molekül – nur diskrete Zustände einnehmen können, die von der Größe des Partikels abhängen. So können z. B. Nanopartikel aus Metallatomen halb- oder nichtleitend werden und neue optische Eigenschaften wie z. B. Farbe, Fluoreszenz oder Transparenz aufweisen.

Eine wesentliche Grundlage vieler Eigenschaften (z. B. thermische, magnetische oder mechanische) von Nanomaterialien ist ihr sehr großes Verhältnis von Oberfläche (bzw. Grenzfläche) zu Volumen. Die Oberflächenatome haben im Allgemeinen nicht abgesättigte Bindungen, die eine hohe Reaktivität haben können und so die chemischen Eigenschaften (z. B. katalytische Aktivität) der Partikel entscheidend beeinflussen können. Mit zunehmendem Oberflächenanteil steigt auch die Oberflächenenergie der einzelnen Teilchen an, wodurch sich z. B. deren Schmelzpunkt erniedrigt oder die Sinteraktivität erhöht wird. Über eine präzise Kontrolle der Größe der Partikel lassen sich ihre Eigenschaften in bestimmten Grenzen einstellen.

Eine zunehmend wichtige Rolle in der Nanotechnologie spielt das Verständnis sowie die technische Nutzung und Steuerung von Selbstorganisationsprozessen, die insbesondere bei biologischen Systemen weit verbreitet sind. Da diese Mechanismen noch längst nicht verstanden sind, werden vorwiegend bekannte Selbstorganisationsphänomene eingesetzt und modifiziert. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist der Aufbau komplexer Aggregate aus DNA-Molekülen und Nanopartikeln durch programmierbare Selbstorganisation kurzer DNA-Moleküle nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip.

Nanoskalige Werkstoffe und Materialien bilden eine wesentliche Grundlage der gesamten Nanotechnologie. Sie zeigen eine Reihe außergewöhnlicher Eigenschaften, die in herkömmlichen Materialien nicht vorgefunden werden. Hierzu gehören auf der strukturellen Seite z. B. Superplastizität, erhöhte Härte, Bruchzähigkeit und -festigkeit. Auf der funktionellen Seite sind dies z. B. verbesserte weichmagnetische Eigenschaften, Riesenmagnetowiderstandseffekt, verringerte oder erhöhte Wärmeleitfähigkeit oder höherer elektrischer Widerstand.

1.5 Interdisziplinarität

Die Nanotechnologie erfordert einen hohen Grad an interdisziplinärer und transdisziplinärer Kooperation und Kommunikation. Dies liegt zum einen darin begründet, dass auf der Nanoebene Begriffswelten der Physik, Chemie und Biologie miteinander „verschmieren", zum anderen darin, dass die Methoden einer einzelnen Disziplin durch Verfahren und Fachkenntnisse aus den anderen Fachrichtungen ergänzt werden können oder müssen. Um nanoskalige Objekte zu untersuchen, werden beispielsweise hauptsächlich physikalische Verfahren verwendet. Auch die Miniaturisierung und Strukturierung nutzt Techniken, die auf physikalischen Prinzipien basieren. Die Herstellung nanoskaliger Partikel hingegen ist in erster Linie eine Domäne der Chemie. Biologische Nano-Objekte wie Proteine, Enzyme oder Viren entstehen durch Selbstorganisation nach Bauplänen der Natur, in der ein Großteil der grundlegenden Prozesse wie z. B. die Photosynthese auf der Nanoskala bzw. auf molekularer Ebene abläuft.

Bei technologischen Anwendungen nanoskaliger Objekte ist hingegen vielfach eine Kombination verschiedener Verfahren nötig wie z. B. lithographischer, bio- bzw. gentechnischer oder chemischer Verfahren, der Lasertechnik oder von Plasmaverfahren. In der Nanotechnologie werden folglich die klassischen Disziplinen Chemie, Physik und Biologie nicht mehr getrennt zu wissenschaftlichen Erkenntnissen gelangen, sondern durch transdisziplinäre Forschungsarbeit gemeinsam die Potenziale physikalischer Gesetzmäßigkeiten, chemischer Stoffeigenschaften und biologischer Prinzipien erschließen.

2. Aktivitätsfelder der Nanotechnologie

2.1 Nanoskalige Basisstrukturen

Dieser Abschnitt soll in grundlegende geometrische Arrangements von Atomen bzw. molekularen Bausteinen einführen, die die Nanotechnologie letztlich konstituieren. Die Darstellung stützt sich wesentlich auf ein Gutachten des Fraunhofer-Instituts für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (FhG-INT 2003).

Im Folgenden wird unterschieden zwischen „punktförmigen" Strukturen, die in allen drei Dimensionen kleiner als 100 nm sind (z. B. Nanokristalle, Cluster oder Moleküle), linienförmigen Strukturen, die in zwei Dimensionen nanoskalig sind (z. B. Nanodrähte, Nanoröhren und Nanogräben) und Schichtstrukturen, die in nur einer Dimension nanoskalig sind. Gesondert werden „inverse" Nanostrukturen, also Poren, sowie komplexe Strukturen wie supramolekulare Einheiten oder Dendrimere betrachtet.

2.1.1 Punktförmige Strukturen

Punktförmige, d. h. in allen drei Raumrichtungen nanoskalige Strukturen treten als kristalline oder amorphe Nanopartikel sowie als Cluster, Nanoinseln oder größere Moleküle auf. Ihre elektrischen, optischen und chemischen Eigenschaften können stark von denen eines Festkörpers aus demselben Material abweichen – z. B. werden Metalle bei sehr kleinen Teilchengrößen zu Isolatoren. Charakteristisch ist, dass ihre Eigenschaften im Bereich zwischen denen von Festkörpern und Molekülen liegen.

Im Verhältnis zu ihrem Volumen besitzen Nanopartikel eine sehr große Oberfläche. So liegen beispielsweise bei einem Partikel mit 10 nm Durchmesser ca. 20 % aller Atome an der Oberfläche, bei einem Partikel von 1 nm Durchmesser können es über 90 % sein. Atome an der Oberfläche haben nicht so viele Bindungspartner wie Atome im Inneren. Sie besitzen daher andere Eigenschaf-

ten und sind z. B. reaktiver. Viele makroskopische Eigenschaften von aus Nanopartikeln bestehender Materie sind durch die Oberflächeneigenschaften bestimmt.

So neigen Nanopartikel dazu, sich zu größeren Einheiten zusammenzulagern. Daher müssen diese häufig durch außen chemisch angebundene Atomgruppen („Liganden“) stabilisiert bzw. vor Agglomeration geschützt werden. Aus demselben Grund sind für viele Nanopartikel gute Sintereigenschaften typisch, die die Herstellung von superplastisch verformbaren Keramiken unterhalb der Schmelztemperaturen ermöglichen. Auch extrem große innere Oberflächen lassen sich erzeugen. Diese besondere Eigenschaft von nanoporösen Werkstoffen lässt sich z. B. für Katalysatoren, Membranen und Elektroden nutzen.

Die elektronischen und optischen Eigenschaften von Nanopartikeln sind stark von der Größe der Partikel abhängig. Eine präzise Kontrolle der Größe der Partikel ist daher ein Schlüssel für maßgeschneiderte Eigenschaften.

Ein schönes Beispiel hierfür sind Cadmiumtellurid-Nanopartikel, deren Fluoreszenzfarbe sich allein durch Größenänderung von grün über gelb bis rot einstellen lässt (vgl. Abbildung 3). Solche Nanokristalle können z. B. durch Ausfällen aus einer Lösung hergestellt werden und eignen sich beispielsweise als Marker in biologischen Systemen oder zum Bau von Leuchtdioden.

Eine wegen ihrer besonderen Struktur und ihren außergewöhnlichen Eigenschaften zunehmend wichtiger werdende Stoffklasse sind die Fullerene. Hierbei handelt es sich um aus Kohlenstoff bestehende mehr oder weniger runde, aus Fünfecken und Sechsecken aufgebaute Käfigmoleküle von unterschiedlicher Größe. Die Abbildungen in 4 und 5 zeigen das kleinste realisierbare Fulleren, das instabile C_{20}-Molekül, sowie das bekannteste, das C_{60}-Molekül. Größere Fullerene bieten z. B. die Möglichkeit, Fremdatome in ihrem Inneren einzukapseln. Neben den einwandigen Käfigen gibt es auch zwiebelartig mehrschalige (so genannte Onions) sowie kegel- bzw. kegelstumpfförmige Fullerene. Die Herstellung von Fullerenen in makroskopischen Mengen kann durch Verdampfung von Graphit erfolgen (Krätschmer et al. 1990). Dieses Verfahren erzeugt Ruß, der zu etwa 10 % aus Fullerenen besteht.

Zu den Eigenschaften der Fullerene, die ein hohes Anwendungspotenzial haben, gehört unter anderem die nahezu perfekte Kugelform und hohe mechanische Stabilität des C_{60}-Moleküls, welches somit als ideales Kugellager zwischen ultrapolierten Oberflächen infrage kommt. Darüber hinaus bieten Fullerene insbesondere an den Doppelbindungen die Möglichkeit, funktionale Gruppen an das Molekül zu binden, und zwar räumlich selektiv und an definierten Stellen. Die sich hieraus ergebende Vielfalt an Design- und damit Anwendungsmöglichkeiten lässt sich derzeit noch nicht klar umreißen. Aufgrund der guten Biokompatibilität von Kohlenstoff sind eine Reihe von medizinischen Anwendungen zu erwarten. Hier spielt die Möglichkeit, außen am Fullerenkäfig bioaktive bzw. -selektive Moleküle zu verankern, eine Schlüsselrolle. So können beispielsweise in funktionalisierten Fullerenen eingekapselte Radionuklide für Anwendungen in Diagnostik und Therapie gezielt an den interessierenden Ort gebracht werden.

Abbildung 3

Lösungen verschieden großer CdTe-Halbleiter-Nanopartikel. Übergang von grüner zu roter Fluoreszenz mit zunehmender Partikelgröße von ca. 2 auf 5 nm



Quelle: Weller 2003

Abbildung 4

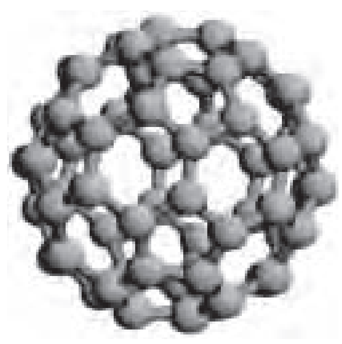
Das C_{20}-Fulleren im Kugel-Stab-Modell, bestehend aus zwölf Fünfecken



Quelle: SEED 2003

Abbildung 5

Das C_{60}-Fulleren im Kugel-Stab-Modell, bestehend aus zwölf Fünfecken und zwanzig Sechsecken



Quelle: SEED 2003

Nanopartikel sind nicht nur in isolierter Form, sondern auch im Materialverbund von hohem Interesse. Aus Nanopartikeln aufgebaute Materialien können als Nanopulver vorliegen, außerdem als aus (ligandenstabilisierten) Clustern zusammengesetzter Festkörper (Clustermaterie), als Nanokomposit (z. B. von amorpher Matrix umgebene Nanokristallite), als Agglomerate oder gesinterte Nanopulver, die nanoporöse Festkörper aufbauen, als laterale Nanostrukturen auf Festkörperoberflächen sowie dispergiert in flüssigen oder gasförmigen Medien.

So können beispielsweise durch Deposition von Nanokristallen auf einer Oberfläche so genannte Nanoinseln hergestellt werden, die sich besonders als Katalysatormaterialien eignen.

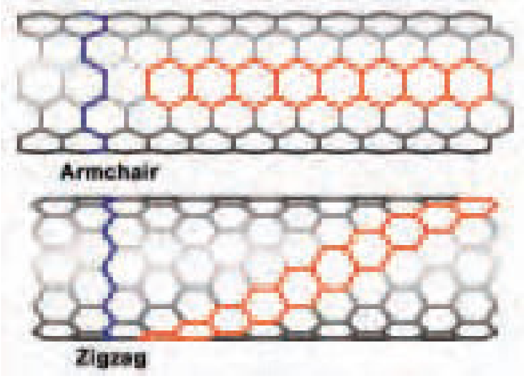
2.1.2 Linienförmige Strukturen

Linienförmige Nanostrukturen treten vor allem auf als Nanoröhren, Nanodrähte, Nanostäbe sowie Nanogräben auf Oberflächen. Als Nanodrähte bezeichnet man faserartige Strukturen mit meist wenigen Nanometern Durchmesser und Längen bis in den Mikrometerbereich hinein. Im Gegensatz dazu ist die Länge von Nanostäben nur etwa 4- bis 10-mal so groß wie ihr Durchmesser. Nanogräben sind inverse Nanostrukturen auf Oberflächen, die z. B. mit lithographischen Verfahren hergestellt werden können. Durch Wachstum entlang den Kanten von atomar gestuften Oberflächen lassen sich auch linienförmige Nanoinseln erzeugen.

Die bisher mit Abstand am intensivsten untersuchten linienförmigen Nanostrukturen sind jedoch Nanoröhren aus Kohlenstoff. Sie bestehen aus zylinderförmigen Graphitlagen (Abbildung 6) und sind in ihrer Struktur eng verwandt den Fullerenen. Ihr Durchmesser reicht von knapp einem bis etwa 100 nm, die Länge kann derzeit mehrere hundert Mikrometer erreichen.

Abbildung 6

Modell einwandiger Kohlenstoffnanoröhren mit leiterförmiger (oben) bzw. spiralförmiger (unten) Anordnung der Graphitringe



Quelle: Gross 2003

Kohlenstoffnanoröhren können im Kilogramm- bis Tonnenmaßstab mit dem Verfahren der katalytischen chemischen Gasphasenabscheidung (Catalytic Chemical Vapour Deposition, CCVD) hergestellt werden. Dabei werden Kohlenwasserstoffe oder Kohlenmonoxid bei erhöhter Temperatur an Katalysatorpartikeln – meist Übergangsmetall-Nanopartikel auf einem porösen Träger – zersetzt. An der Oberfläche der Partikel wachsen die Kohlenstoffnanoröhren heraus. Neben den einwandigen Nanoröhren können auch mehrwandige sowie verzweigte (Y-förmige) Nanoröhren hergestellt werden.

Eine Vielzahl potenzieller Anwendungsbereiche für Kohlenstoffnanoröhren wird derzeit diskutiert (FhG-INT 2003; VDI 1998). Im Bereich elektronischer Anwendungen bietet sich ein großes Anwendungspotenzial, da die Röhren in Abhängigkeit von ihrer Struktur (Anordnung der Sechsecke) entweder leitend oder halbleitend sind. Daher sind sie zum Beispiel als leitende Verbindungen für nanoelektronische Bauteile (Nanodrähte, Quantendrähte) von Interesse. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass sie als Transistoren und logische Bauelemente funktionieren können, oder aber als Spitzen für Feldemissionsdisplays, einer ultraflachen Alternative für Kathodenstrahlröhren. Weiterhin zeigen sie entlang der Röhre eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit, womit sie zur Wärmeabfuhr aus (nano)elektronischen Bauelementen einsetzbar sind.

Wegen ihrer mechanischen Eigenschaften – sehr große Zugfestigkeit, hohe Stabilität – werden Kohlenstoffnanoröhren u. a. als ideale Fasern für Polymerverbundwerkstoffe angesehen. Sie gelten als Kandidaten für uniaxiale Gleitlager (so genannte Wälzlager) bzw. für harte, verschleißarme Schutzschichten.

Darüber hinaus sind Anwendungen als Rastersondenspitzen möglich oder als Nanogreifer bzw. -manipulatoren in nanotechnischen Aktoren. Auch ihre Anwendung als Template für die Herstellung von Nanowerkstoffen wird erforscht.

Wegen ihrer chemischen Eigenschaften wird die Speicherung von Wasserstoff in Nanoröhren und anderen Fullerenderivaten diskutiert. Die anfängliche Euphorie ist aber zwischenzeitlich etwas abgekühlt, da die anfänglich publizierten sehr hohen Werte auf fehlerbehafteten Experimenten zu beruhen scheinen. Darüber hinaus könnten sich Nanoröhren jedoch als Katalysatorträger oder in Anwendungen als molekulare Filter bzw. Membranen oder als Nanoreaktoren eignen. Auch exotisch erscheinende Anwendungsmöglichkeiten sind in der Diskussion, z. B. mit flüssigem Gallium gefüllte Nanoröhren, die als nanoskaliges „Thermometer“ dienen könnten.

Darüber hinaus wird vermehrt versucht, Nanoröhren aus anderen Materialien zu synthetisieren und damit neue Anwendungen zu erschließen. Beispiele hierfür sind NbS_2 (Niobsulfid), WS_2 (Wolframsulfid) oder die zu Kohlenstoff isoelektrische Verbindung BN (Bornitrid). Unter bestimmten Bedingungen bilden sich Nanoröhren auch in Kegelform aus.

Nanoröhren aus Halbleitern – Silizium, aber auch Verbindungshalbleiter wie z. B. Indium-Phospid – können durch lithographische Bearbeitung von nanoskaligen Halbleitermehrfachschichten, deren Kristallgitter gegeneinander verspannt sind, präpariert werden. Unter bestimmten Bedingungen rollen sich diese Schichten spiralförmig zu Röhren mit Innendurchmessern von 15 bis 500 nm und Längen bis zu einigen zehn Mikrometern auf. In jüngster Zeit werden auch vermehrt Nanopartikel als Katalysatoren für das gesteuerte Wachstum von Halbleiter-Nanodrähte eingesetzt.

2.1.3 Schichtstrukturen

Schichtstrukturen sind innerhalb der Nanotechnologie ein äußerst wichtiger Bereich und sind in der Anwendung bis hin zum industriellen Einsatz am weitesten fortgeschritten. Die Schichtdicke im Nanometerbereich, oft wenige Atomlagen, ermöglicht erst bestimmte Effekte – z. B. Quanten-Effekte – oder ist Voraussetzung für die Nutzung der Eigenschaften des Schichtmaterials. Teilweise handelt es sich dabei um eingeführte Produkte (z. B. Computer-Festplatten), teilweise noch um Gegenstände von Forschung und Entwicklung im Übergang zur Anwendung (antibakterielle, hydrophobe und oleophobe Textilbeschichtungen, Mehrfachschichten für Röntgenoptiken).

Aus den heutigen Computer-Festplatten sind Nanoschichten nicht wegzudenken. So beruht die hohe Speicherdichte auf dem so genannten Riesenmagnetwiderstand (Giant Magnetoresistance, GMR)[1], der sich in einem Schichtsystem aus Eisenschichten, die durch eine wenige nanometerdicke Chromschicht voneinander getrennt sind, einstellt. Auch die Schutzschicht aus Kohlenstoff, die die Speicherschicht vor Oxidation und Abrieb schützt, darf nur wenige Nanometer dick sein, damit der Schreib-Lesekopf dicht genug (ca. 25 nm) über der magnetisierten Schicht „fliegen“ kann.

Ultradünne organische Schichten auf festen Substraten haben bezüglich der damit erreichbaren Änderung der Oberflächeneigenschaften (Benetzbarkeit, Gleitverhalten oder Biokompatibilität) große technische Bedeutung gewonnen. Solche Schichten können durch abwechselnde Adsorption von Polyelektrolyten mit positiv und negativ geladenen Ketten aus wässrigen Lösungen hergestellt werden. Das Verfahren ist sehr vielseitig, da statt eines der beiden Polyelektrolyte auch geladene anorganische Partikel und Farbstoffe oder auch Biomoleküle wie DNA oder Proteine in die Schichten eingebaut werden können. Damit ergeben sich Einsatzmöglichkeiten in der Katalyse und Sensorik, aber auch für Funktionsmaterialien wie lichtemittierende Polymerschichten.

Bringt man in eine Schicht eine periodische Struktur ein, deren Abstände nur ein geringes Vielfaches der Gitterkonstantanten des Basismaterials betragen, so entsteht ein so genanntes „Übergitter“. Dies führt auch zu einer neuen Bandstruktur des Schichtsystems, das für maßgeschneiderte optische und elektronische Eigenschaften genutzt werden kann.

2.1.4 Porenstrukturen

Erst seit einigen Jahrzehnten wird an der gezielten Synthese von Materialien mit definierter Porosität gearbeitet. Diese sind von sehr großem wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Interesse, da sie nicht nur an ihrer äußeren Oberfläche, sondern durch das ganze Volumen des Materials hindurch mit Atomen, Ionen oder Molekülen wechselwirken können. Dabei können nanoporöse Materialien Oberflächen von mehreren hundert Quadratmetern pro Gramm haben. Altbekannte Anwendungen für sie finden sich in Katalyse, Ionenaustausch, Filtration und Gasseparation, aber z. B. auch in der Wärmeisolation und bei Antireflexionsbeschichtungen.

Grundsätzlich unterschieden werden muss jeweils zwischen schwammartigen und schaumartigen porösen Strukturen. Während die schwammartigen eine offene Porosität zeigen, die über das ganze Körpervolumen einen Kontakt mit einem anderen Medium ermöglicht, sind die Poren der schaumartigen Strukturen abgeschlossen.

---

[1] Mit heutiger Technologie erscheinen bis zu 40 Gbit pro Quadratzoll möglich (Kilian 2003).

Wichtigste Kriterien für eine effiziente technische Nutzbarkeit sind i. d. R. zum einen eine möglichst einheitliche Porengröße, zum anderen eine möglichst gleichförmige Verteilung der Poren durch das ganze Werkstück, das z. B. eine Membran sein kann. Von erheblicher Bedeutung ist auch die chemische Zusammensetzung der Festphase. So kann der Werkstoff selbst z. B. hydrophil oder hydrophob sein, was bei gleicher Porosität völlig andere Einsatzoptionen ergibt. Darüber hinaus lassen sich die Porenoberflächen chemisch modifizieren, z. B. durch dünne Schichten oder Nanoinseln aus Katalysatormetallen wie Platin oder Rhodium, sowie auch biologisch aktivieren.

Neben den genannten funktionellen Aspekten können poröse Werkstoffe jedoch auch in strukturellen Anwendungen erhebliche Vorteile gegenüber massiven bieten, so z. B. im Leichtbau. Auch hier ist es in der Regel extrem wichtig, ein einheitliches Gefüge mit monodisperser Porengröße herzustellen, da bei mechanischer Belastung neben der Porenform die Größe der Poren ausschlaggebend für ein Bauteilversagen ist. Je größer die Pore, desto geringer die zur Risseinleitung benötigte Kraft.

Aus fast allen Werkstoffen lassen sich relativ einfach poröse Strukturen herstellen, jedoch ist die Darstellung einer definierten Porosität im nm-Bereich in der Regel nicht trivial. Eine besonders elegante Methode ist das Sol-Gel-Verfahren, mit welchem insbesondere hochporöse oxidische Gläser und Keramiken (über so genannte Aerogele) mit Dichten bis unter 0,01 g/cm^3 synthetisiert werden können. Bei Metallen ist die anodische Volumenoxidation von Aluminium zu einem nanoporösen Aluminiumoxid-Körper seit einiger Zeit in der Forschung. Erste Anwendungen dieser offenporigen Körper im Bereich Drug Delivery und Separationstechnik werden untersucht. Bei Halbleitern ist als Beispiel nanoporöses Silizium zu nennen, das durch die Porosität vor allem über die hierdurch erheblich verstärkte Lumineszenz weitere Anwendungsmöglichkeiten gewinnt.

2.1.5 Komplexe Strukturen

Komplexe Strukturen können z. B. als supramolekulare Strukturen durch Zusammenlagerung molekularer Bausteine – z. B. mittels Wasserstoffbrückenbindungen – entstehen. Unter geeigneten Bedingungen erfolgt der Aufbau solcher komplexer Strukturen häufig spontan und ohne äußere Steuerung. Aus nanotechnologischer Sicht wichtige supramolekulare Strukturen sind derzeit vor allem Flüssigkristalle und Proteinaggregate.

Flüssigkristalle sind Stoffe und Werkstoffe mit kristallähnlicher Fernordnung ihrer Bausteine, aber lokaler Beweglichkeit der einzelnen Moleküle. Sie sind allgegenwärtig im täglichen Leben. Als Zellmembran strukturieren sie Lebensformen, als Displaymaterialien (LCD, Liquid Crystal Display) findet man sie heute auf fast jedem elektronischen Gerät. Dabei steuert die nanoskopische Molekülstruktur die makroskopischen Materialeigenschaften. Ein besseres Verständnis dieser Zusammenhänge und eine daraus abgeleitete zielgerichtete Synthese neuer Materialien wird bestehende Anwendungen optimieren, aber auch völlig neue Optionen eröffnen. Gegenwärtige Anwendungen sind u. a. Displays, optische Speicher und Templat-Synthesen nanopartikulärer bzw. -strukturierter Materialien. Neue Anwendungen liegen derzeit in den Bereichen Photoleiter, Reflektoren und Farbstoffe. Zukunftspotenzial wird erwartet in der Photovoltaik sowie der Formulierung von Arzneimitteln, insbesondere bezüglich ihrer Verbringung („Drug Delivery“).

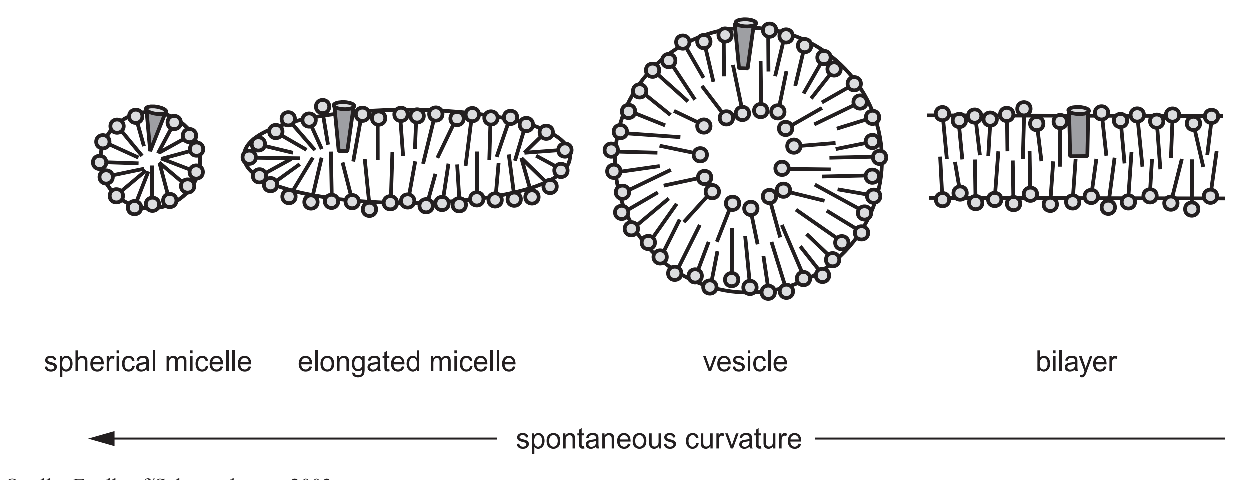
Zu den Flüssigkristallen gehören aus amphiphilen Molekülen, das sind Moleküle mit einem hydrophilen Kopf und einem hydrophoben Schwanz, sich selbstorganisierende Strukturen wie Mizellen und Liposomen. Mizellen sind aus einer Lage amphiphiler Moleküle aufgebaute Supramoleküle. Je nach äußeren Bedingungen können sie Formen zwischen Kugeln und zylindrischen Stäben annehmen (Abbildung 7 ganz links und Mitte links). In polaren Lösungen zeigt dabei der hydrophile Kopf nach außen, in nichtpolaren Lösungen weist er in das Mizelleninnere (ergibt eine so genannte Inverse Mizelle). Liposomen sind aus einer Doppellage amphiphiler Moleküle aufgebaute kugelförmige Aggregate, wobei in der Regel die hydrophilen Enden jeweils als Schichtoberfläche dienen (Abbildung 7 Mitte rechts). Mizellen und Liposomen spielen z. B. eine wichtige Rolle bei der Synthese von Werkstoffpulvern mit einheitlicher genau definierter Korngröße. Darüber hinaus können sich die Doppelschichten auch in einer Ebene ausrichten (Abbildung 7 rechts) und aufgrund ihrer flüssigkristallinen Eigenschaften als Membranen dienen.

Eine weitere für nanotechnologische Anwendungen interessante molekulare Basisstruktur ist die Desoxyribonukleinsäure (DNA). Bei der DNA handelt es sich um ein spiralförmig gewendeltes Molekül aus zwei Biopolymersträngen, die über Wasserstoffbrückenbindungen zwischen jeweils komplementären Basenpaaren aneinandergekoppelt sind. Abbildung 8 zeigt eine Prinzipskizze eines DNA-Strangfragmentes. Die Komplementarität der Basenpaare erlaubt molekulare Erkennung, die für nanotechnologische Prozesse genutzt werden kann.

Eine zunehmend wichtige Stoffklasse sind die dendritischen Polymere (Dendron, griech.: Baum). Hierbei handelt es sich in der Regel um kugelförmige dreidimensionale Makromoleküle, die aus einem Kern und sich von dort aus verzweigenden Molekülästen aufgebaut sind. Dendritische Polymere bieten aufgrund ihrer variablen molekularen Architektur vielfältige Möglichkeiten zur Gestaltung verschiedenster Funktionalitäten. So können im Inneren der Makromoleküle unterschiedlich große Hohlräume geformt und alle Bereiche des Makromoleküls über die Auswahl bestimmter molekularer Bausteine funktionalisiert werden.

Abbildung 7

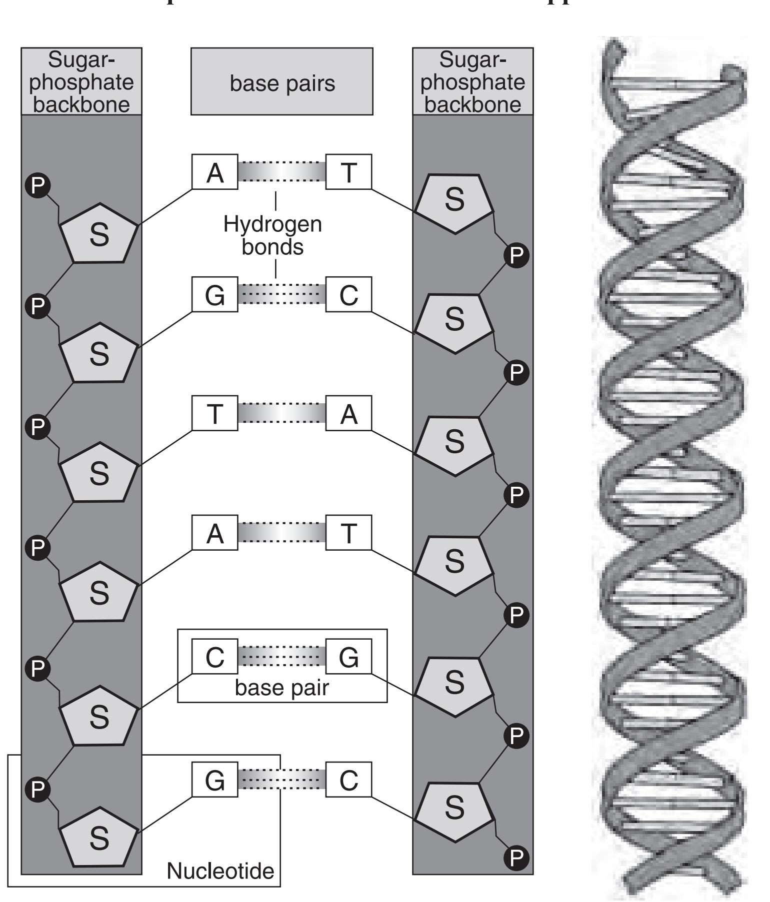
Formen von Aggregaten aus amphiphilen Molekülen



Quelle: Egelhaaf/Schurtenberger 2003

Abbildung 8

Prinzipskizze des Aufbaus der DNA-Doppelhelix



Quelle: AE 2003

2.2 Verfahren und Werkzeuge der Nanotechnologie

Verfahren und Werkzeuge, mit denen die – oben beschriebenen – Strukturen hergestellt und analysiert werden können, sind ebenfalls integrale Bestandteile der Nanotechnologie. Ohne die damit assoziierten Technologien wäre die Nanotechnologie nicht denkbar.

Es existiert bereits eine so große Vielfalt an Technologien, die gegenwärtig eingesetzt und weiterentwickelt werden, dass es im Rahmen dieses Berichts nicht möglich ist, einen umfassenden Überblick zu geben. Daher beschränkt sich die folgende Darstellung darauf, einige Besonderheiten und Gemeinsamkeiten der Techniken zu diskutieren und anhand ausgewählter Beispiele einen Eindruck von der Breite dieses Technologiefeldes zu geben (eine vertiefende Darstellung findet sich z. B. in FhG-INT 2003).

2.2.1 Nanoanalytik

Eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung der Nanotechnologie ist die Möglichkeit, sowohl die Struktur von Materie als auch die ablaufenden Prozesse auf der Nanoskala und auf atomarer Ebene unmittelbar zu untersuchen. Die hierzu angewendeten Analyseverfahren sind quasi die „Augen" der Nanotechnologie.

Die Tür zur Nanowelt wurde 1981 mit der Entwicklung des Rastertunnelmikroskops aufgestoßen, mit dem es erstmals gelang, atomare Strukturen direkt sichtbar zu machen. Im Gefolge wurden das Rasterkraftmikroskop sowie weitere Rastersondenverfahren entwickelt, die mehr und mehr nicht nur zur Analyse, sondern auch zur Herstellung und Manipulation von Strukturen im Nanomaßstab bis hinunter auf die atomare Ebene eingesetzt werden.

Parallel dazu wurden zunächst ganz unabhängig vom Label „Nanotechnologie" unterschiedlichste physikalische und chemische Analyseverfahren (weiter) entwickelt im Hinblick auf das Ziel, immer genauere Einblicke in die Struktur von Materie auf der atomaren und molekularen Ebene zu erhalten. Die Verfahren sind teilweise bereits seit langem in den Materialwissenschaften und verwandten Forschungsgebieten etabliert. Sie werden nun auch intensiv in der Nanotechnologie eingesetzt bzw. „sind" Nanotechnologie.

Rastersondenverfahren

Eine zentrale Rolle in der Nanoanalytik spielen Rastersondenmikroskopverfahren (so genannte „SXM"-Verfahren). Das einheitliche Grundprinzip dieser Verfahren besteht darin, dass die lokale Wechselwirkung zwischen einer Oberfläche und einer sehr nah (in atomaren Dimensionen) an die Oberfläche herangebrachten Spitze einer Mikrosonde stark abstandsabhängig ist. Mit der Mikrosondenspitze wird die Oberfläche abgetastet, und man erhält ein zweidimensionales Abbild der gemessenen physikalischen Größe bzw. der Oberfläche.

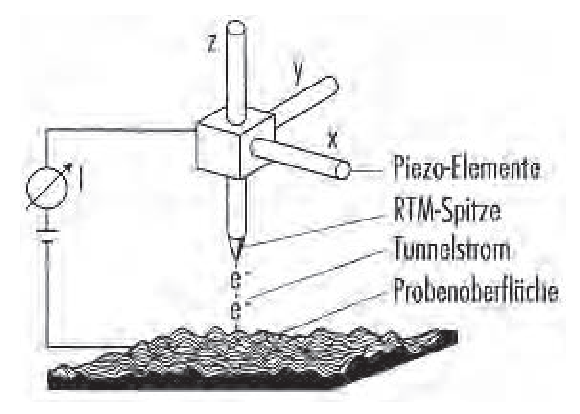
Das Rastertunnelmikroskop (engl. Scanning Tunneling Microscope, STM) (Abbildung 9) nutzt den quantenmechanischen Effekt aus, dass bei der Annäherung einer feinen Spitze an die Oberfläche einer Probe bereits vor dem Kontaktschluss Elektronen auf die andere Seite hinübergelangen („tunneln") können. Dies ist als Tunnelstrom zwischen der Probe und der Rastersondenspitze messbar. Da der Tunnelstrom stark abstandsabhängig ist, kann er als Maß für den Abstand zwischen Spitze und Probe benutzt werden.

Indem die Spitze in einem Zeilenraster über die Probe geführt wird, kann rechnergestützt aus dem gemessenen Tunnelstromsignal ein topographisches Abbild der zu untersuchenden Oberfläche ermittelt werden. Da im Idealfall nur wenige Atome an der Spitze zum Tunnelstrom beitragen, lässt sich die Oberfläche mit atomarer Auflösung darstellen.

Ein Nachteil des Rastertunnelmikroskops ist, dass die Methode auf Isolatoren bzw. schlecht leitenden (z. B. oxidierten) Oberflächen nur schwer anwendbar ist. Bei elektrisch leitenden Materialien lassen sich jedoch weitere Informationen über Materialinhomogenitäten, die lokale Leitfähigkeit oder andere elektronische Eigenschaften erhalten.

Abbildung 9

Prinzip der Funktionsweise des Rastertunnelmikroskops



Quelle: Binnig/Rohrer 2003

Ein sehr flexibel einsetzbares Verfahren zur Untersuchung von Oberflächen ist die Rasterkraftmikroskopie (engl. Atomic Force Microscopy, AFM), die die Ablenkung eines Biegebalkens durch die anziehende oder abstoßende Wechselwirkung zwischen Oberfläche und Spitze zur Bestimmung der Oberflächenstruktur ausnutzt. Mit dem Kraftmikroskop lassen sich z. B. organische Schichten auf isolierenden Substraten direkt abbilden, p-n-Übergänge in dotierten Halbleitern mit sub-mm-Auflösung vermessen oder biologische Präparate analysieren.

Aus diesen beiden Grundtypen ist inzwischen ein ganzes Arsenal an Rastersondentechniken für unterschiedlichste Anwendungen weiterentwickelt worden. Beispielsweise

die Magnetkraftmikroskopie (Magnetic Force Microscope, MFM) zur Messung der magnetischen Oberflächenstruktur, das elektrostatische Kraftmikroskop (Electrostatic Force Microscope, EFM) zur Messung elektrostatischer Potenzialverteilungen an der Oberfläche oder das Lateralkraft-Mikroskop (Lateral Force Microscope, LFM) zur Messung von Lateralkräften bei tribologischen Fragestellungen.

Weiterentwicklungen gibt es auch bei speziellen Rastersondenspitzen, die z. B. mit zusätzlichen Funktionalitäten versehen werden können. Mit elektrisch leitfähigen Kohlenstoffnanoröhren können beispielsweise Einzel-Elektronentransfers durchgeführt werden („Erbsenzählen“). Das gezielte Anbringen von chemischen Gruppen an die Spitze erlaubt es, beim Abtasten der Oberfläche nicht nur topografische, sondern zusätzlich chemische Informationen zu erhalten.

Andere nanoanalytische Verfahren

Ein ganzes Arsenal hochentwickelter, teilweise seit langem etablierter physikalischer und chemischer Verfahren und Geräte kann für die Analytik auf der Nanometerskala eingesetzt werden. Dennoch ist eine ständige Weiterentwicklung erforderlich, um diese Methoden auch mit einer Auflösung im Nanometerbereich betreiben zu können. Diese Methoden arbeiten z. B. mit Elektronen-, Ionen- oder Photonenstrahlen, mit Feldemissions- und Tunneleffekten oder basieren auf elektrischen, optischen, thermischen, akustischen oder magnetischen Prinzipien.[2] Diese werden je nach Fragestellung problemangepasst und komplementär eingesetzt.

Stellvertretend für die Vielfalt der einsetzbaren Methoden sollen hier nur zwei Verfahren näher beschrieben werden.

Eine Methode zur Bestimmung der lokalen Elementzusammensetzung ist die ortsaufgelöste Massenspektroskopie. Bei der Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS) wird ein feiner Strahl von beschleunigten, geladenen (Ionen) oder ungeladenen (Atome) Teilchen auf die zu untersuchende Oberfläche geschossen. Diese Teilchen schlagen Atome oder Moleküle aus dem Festkörper heraus, die mit einem Massenspektrometer detektiert und analysiert werden können.

Ein anderes Verfahren, das die unmittelbare Abbildung nanoskaliger Oberflächenbereiche ermöglicht, ist die so genannte optische Nahfeld-Mikroskopie (Scanning Nearfield Optical Microscopy, SNOM). Hierbei dient die Spitze einer Glasfaser mit einer Öffnung von 20–100 nm als Lichtquelle. Auf diese Weise können die Auflösungsbeschränkungen (Beugungsgrenze) anderer optischer Methoden, die durch die Wellenlänge gegeben sind, umgangen werden. Als Sonde eingesetzt können mit der Spitze charakteristische optische Eigenschaften als Funktion des Ortes vermessen werden, z. B. die lokalen Lumineszenzeigenschaften.

2.2.2 Prozesstechnologien

Nanoskalige Werkstoffe werden in der Regel über altbekannte Verfahren hergestellt, die jedoch im Laufe der Zeit weiter verfeinert wurden, um eine immer bessere Kontrolle über die chemische Zusammensetzung und Struktur zu erhalten. Inzwischen wird eine solche Fülle an Verfahren benutzt, dass ein erschöpfender Überblick hier nicht gegeben werden kann (eine tabellarische Übersicht findet sich im Anhang; siehe hierzu auch z. B. FhG-INT 2003).

Nanomaterialien können aus der Gasphase, aus der flüssigen Phase und aus Festkörpern hergestellt werden. Dazu dienen physikalische und chemische Verfahren sowie rastersondenbasierte Techniken. Die Produkte liegen meist in Form von Partikeln oder dünnen Schichten vor. Insbesondere bei den Verfahren, die die Gasphase oder die flüssige Phase zur Partikel- oder Schichtherstellung nutzen, beobachtet man häufiger Selbstorganisationsprozesse, die bestimmte Formen und Strukturen herausbilden.

Bei den physikalischen Verfahren handelt es sich meist um Prozesse, bei denen unter kontrollierten Bedingungen, meist im Vakuum, Atome bzw. Ionen erzeugt und auf einem Substrat abgeschieden werden. Chemische Verfahren gibt es inzwischen in unübersehbarer Fülle zur Herstellung aller erdenklichen Nanostrukturen. Neben Verfahren, die seit vielen Jahren industriell eingesetzt werden, z. B. die Abscheidung dünner Schichten durch Sprühtechniken (Spray-Coating), gibt es auch etliche Neuentwicklungen, die sich im Labor- oder Pilotstadium befinden. Dies gilt insbesondere für die Erzeugung komplexerer Strukturen, wie z. B. Nanodrähte, -röhren, -kapseln, und für den Bereich der Bio-Nanostrukturen, z. B. die Erzeugung von Strukturen mit Erkennungsfunktionen für Biomoleküle (Bioimprinting).

Anhand der Prozesstechnologien lässt sich der Unterschied in der Herangehensweise beim Bottom-up-Ansatz im Vergleich mit dem Top-down-Ansatz sehr gut darstellen. Im Folgenden wird hierzu jeweils ein idealtypisches Beispiel für die beiden Ansätze herangezogen.

Idealtypisches Top-down-Verfahren

Die optische Lithographie ist ein klassisches Beispiel für den Top-down-Ansatz, bei dem man von der Mikrotechnik her kommend durch immer weitere Verfeinerung und Miniaturisierung in den Nanobereich vorstößt. Dies ist das meistverwendete Verfahren zur Erzeugung von Nanostrukturen überhaupt, da die damit erzeugten Halbleiterstrukturen letztlich die Basis der gesamten Elektronikindustrie darstellen.

Bei der optischen Lithographie werden Licht- oder Röntgenstrahlen durch Masken, die die gewünschte Struktur aufweisen, auf eine Probenoberfläche projiziert, die mit

[2] Einige Beispiele für solche Analyseverfahren sind: Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie (XPS), Augerelektronenspektroskopie (AES), Low-Energy Electron Diffraction (LEED), Electron Energy-Loss Spektroskopy (EELS), Röntgendiffraktometrie (XRD), Rasterelektronenmikroskopie (REM), Transmissions-Elektronenmikroskopie (TEM), Energiedispersive-Röntgenskopie (EDX), UV-Photoemissionsspektroskopie (UPS) etc.

einem geeigneten Photolack überzogen ist. Nach der Entwicklung des Lacks wird die abgebildete Struktur auf das Substrat z. B. durch Ätzprozesse übertragen. Für sichtbares und UV-Licht werden Masken aus Glas verwendet, die mit einer Chromschicht und einer lichtempfindlichen Polymerschicht überzogen sind.

Die kleinstmöglichen so erzielbaren Strukturen sind dabei durch die Wellenlänge des Lichts bestimmt. Die kürzeste Wellenlänge des heute in Produktionsprozessen verwendeten UV-Lichts liegt bei 248 nm. Zurzeit wird die 193 nm-Excimerlaserlithographie bei 100 nm Strukturbreite in die Chipindustrie eingeführt.

Es wird aber eine weitere Steigerung des Auflösungsvermögens durch Reduktion der Wellenlänge bis auf 156 nm (F_2-Laser) und weiter hinunter bis in den Röntgenbereich (EUV, Extremes Ultraviolett) mit einer Wellenlänge von 13,5 nm geplant.

Idealtypisches Bottom-up-Verfahren

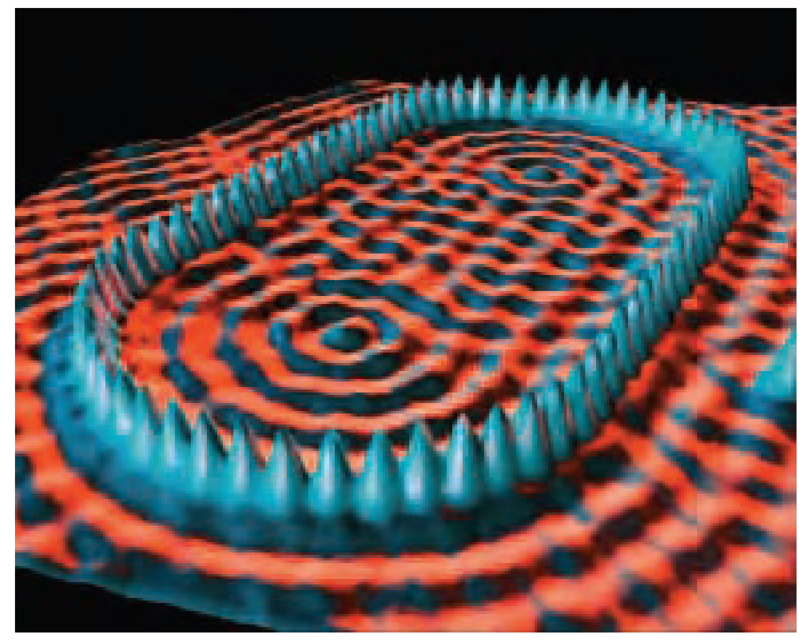
Die oben beschriebenen Rastersondenverfahren (z. B. Rasterkraftmikroskop) können nicht nur zur Analyse, sondern auch zur Erzeugung von Nanostrukturen genutzt werden. In dieser Anwendung stellen Rastersondenmikroskope gleichsam auch „Finger“ für die Nanotechnologie zur Verfügung. Im Prinzip ist es möglich, Atome auf einer Oberfläche anzuordnen (Abbildung 10). Dies kommt dem Bottom-up-Ansatz und der Feynman’schen Vision, Materie gezielt Atom für Atom aufzubauen, gegenwärtig am nächsten.

Dies kann z. B. rein mechanisch geschehen, indem beim Rasterkraftmikroskop der Anpressdruck der Nadel auf die Oberfläche erhöht wird, sodass Atome aus der Oberfläche entfernt werden können (Nanogravur). Es gibt aber auch andere Verfahren, die mit elektrischer oder optischer Unterstützung arbeiten (z. B. optische Nahfeldlithographie). Den Vorteilen der atomaren Präzision der Strukturerzeugung und der Möglichkeit, die erzeugten Strukturen im selben Arbeitsgang zu analysieren, steht jedoch der Nachteil gegenüber, dass es sich um seriell arbeitende Verfahren handelt, die keinen hohen Durchsatz erlauben, und deren industrielle Einsetzbarkeit daher stark eingeschränkt ist.

Eine andere Möglichkeit, Rasterkraftmikroskope als Herstellungswerkzeug in der Nanotechnologie einzusetzen, ist die so genannte Dip-Pen-Lithographie. Hier wird mittels eines Flüssigkeitsfilms, der über die Spitze einer Rasterkraftsonde aufgetragen wird, ein nanoskaliges Muster aufgebracht. In der Flüssigkeit befinden sich selbstorganisierende Moleküle, die sich in dem aufgetragenen Flüssigkeitsfilm ausrichten und dabei eine ca. 10 nm breite Struktur bilden (quasi ein Schreiben mit molekularer Tinte). Diese Molekülanhäufungen können für die weitere Funktionalisierung der Oberfläche genutzt werden, z. B. um gezielt Detektormoleküle auf einem Biochip mit Nanometergenauigkeit anzubringen.

Abbildung 10

Anordnung von Eisenatomen auf einer Kupfer-Einkristall-Oberfläche. Die „Riffel“ im Innern des „Pferches“ sind durch Interferenz entstehende Schwankungen der Elektronendichte



Quelle: Physics Today 1993

Andere Verfahren zur Erzeugung von nanoskaligen Basisstrukturen

Um einen Eindruck davon zu erhalten, auf welche Weise die in Kapitel II.2.1 beschriebenen Basisstrukturen hergestellt werden können, wird im Folgenden jeweils ein typisches Verfahren zur Erzeugung von Nanopartikeln, Linienstrukturen (Drähte, Stäbe, Röhren), Nanoschichten und inversen Nanostrukturen (Nanokapseln, -poren) beschrieben.

Ein typisches chemisches Verfahren zur Herstellung von Nanopartikeln ist die Fällung von Stoffen aus Lösungen, wobei der Fällungsvorgang durch Zusatz geeigneter Substanzen ausgelöst wird. Entweder findet dadurch eine Änderung der Zusammensetzung des Lösungsmittels statt, sodass der auszufällende Stoff in diesem schwer löslich bzw. unlöslich wird, oder es wird eine neue Verbindung gebildet, deren Löslichkeit deutlich geringer als ihre Konzentration in der Lösung ist. Die Bildung der Nanopartikel verläuft schrittweise über kristalline Keime oder amorphe Primärpartikel bis zu Partikelagglomeraten. Die Partikelgröße kann durch Zugabe geeigneter Reagenzien, z. B. Komplexbildner, kontrolliert werden.

Durch Lithographie, Ätzverfahren oder Selbstorganisation hergestellte Nanoporen können als Template für die Herstellung und räumliche Anordnung von Nanodrähten, Nanostäben und Nanoröhren dienen. Als nanoporige Materialien dienen dabei z. B. Zeolithe, nach Ionenbeschuss geätzte Polycarbonatfolien, nanoporöse Gläser oder Filme aus anodisiertem Aluminiumoxid. Das Material der Nanodrähte wird elektrochemisch, chemisch oder physikalisch in den Poren abgeschieden, wobei die Porenoberfläche die räumliche Begrenzung bildet und außerdem als Elektrode oder Kondensationskeim dienen kann. So werden beispielsweise Metall-Nanodrähte durch galvanische Abscheidung in porösen Aluminiumoxidfilmen oder Polymermembranen hergestellt. In porösem Aluminium- oder Siliziumoxid können durch Abscheidung an den Porenwänden Polymer-Nanoröhren und -Nanostäbe erzeugt werden. Halbleitende Nanodrähte können mit Metallkolloiden als Keime mittels Abscheideverfahren aus der Gasphase gewachsen werden, wobei der Durchmesser der Metallkolloide von typischerweise einigen Nanometern den Durchmesser der Nanodrähte bestimmt.

Nanometerdicke organische Schichten lassen sich durch Adsorption von langkettigen Molekülen, die durch Selbstorganisation auf der Oberfläche eines Substrates dicht gepackte monolagige Strukturen ausbilden, präparieren. Die Struktur der gebildeten Schicht ist dabei durch die Anordnung der Substratatome vorgegeben, da die angelagerten Moleküle eine chemische Bindung mit diesen eingehen. Solche Schichten werden als selbstorganisierende Monolagen (SAMs, Self-Assembled Monolayers) bezeichnet. Tragen die Moleküle, die in der Monolage abgeschieden werden, neben der funktionellen Gruppe für die Bindung zum Substrat eine weitere Funktionalität am anderen Ende, so lässt sich diese beispielsweise als Templat zur selektiven Abscheidung von anorganischen Materialien oder zur Immobilisierung von Biomolekülen nutzen.

Polymerpartikel, Viren, Zellen oder Metallcluster lassen sich als Template zur Synthese von Nanokapseln einsetzen. Dazu werden die Templatpartikel in eine Lösung gebracht, die geladene Polymermoleküle enthält. Diese lagern sich an den Templaten an und bilden eine wenige nanometerdicke Schicht. Anschließend werden die so erzeugten Partikel in eine weitere Lösung gegeben, die entgegengesetzt geladene Polymere enthält. Aufgrund elektrostatischer Wechselwirkung entsteht eine weitere Schicht auf jedem Teilchen. Auf diese Weise kann eine Folge von beliebig vielen Schichten erzeugt werden. Zum Schluss werden die Template im Innern in kleinere Moleküle aufgelöst, die durch die Wände diffundieren können. Es entstehen hohle Nanokapseln, die vielfältig einsetzbar sind. Sie eignen sich z. B. als Nanotransporter, als Nanoreaktoren oder Modellsystem zum Studium der Vorgänge in biologischen Zellmembranen.

3. Zusammenfassung

Nanotechnologie ist ein Sammelbegriff für eine weite Palette von Technologien, die sich mit Strukturen und Prozessen auf der Nanometerskala befassen. Ein Nanometer ist ein Milliardstel Meter (10^{-9} m) und bezeichnet einen Grenzbereich, in dem mehr und mehr quantenphysikalische Effekte eine wichtige Rolle spielen.

Wegen ihres Potenzials zur grundlegenden Veränderung ganzer Technologiefelder wird die Nanotechnologie als Schlüsseltechnologie angesehen, die in naher Zukunft nicht nur die technologische Entwicklung beeinflussen, sondern auch maßgebliche ökonomische, ökologische und soziale Implikationen mit sich bringen wird.

Eine allgemein anerkannte Definition der Nanotechnologie existiert bis heute nicht. Im vorliegenden Bericht wird folgende, pragmatisch zu verstehende, Definition verwendet:

1. Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 nm sind.
2. Nanotechnologie macht sich charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer Ebene auftreten.
3. Nanotechnologie bezeichnet die gezielte Herstellung und/oder Manipulation einzelner Nanostrukturen.

Es gibt zwei grundlegende Strategien, um in die Nanodimension vorzustoßen. Auf der einen Seite gibt es den so genannten „Top-down"(=von oben nach unten)-Ansatz, der vor allem in der Physik und physikalischen Technik dominiert. Hier werden von der Mikrotechnik ausgehend Strukturen und Komponenten immer weiter miniaturisiert. Auf der anderen Seite steht der „Bottom-up"(=von unten nach oben)-Ansatz, bei dem immer komplexere Strukturen gezielt aus atomaren bzw. molekularen Bausteinen aufgebaut werden. Dieser Ansatz wird bislang eher durch die Chemie und Biologie repräsentiert, wo der Umgang mit Objekten in der Nanometerdimension seit langem vertraut ist.

Charakteristisch ist beim Übergang auf die Nanometerskala, neben der zunehmenden Dominanz quantenphysikalischer Effekte, dass Oberflächen- bzw. Grenzflächeneigenschaften gegenüber den Volumeneigenschaften des Materials eine immer größere Rolle spielen. Außerdem treten vielfach Selbstorganisationsphänomene auf.

Als Basisstrukturen der Nanotechnologie werden betrachtet: punktförmige Strukturen, die in allen drei Dimensionen kleiner als 100 nm sind (z. B. Nanokristalle, Cluster oder Moleküle), linienförmige Strukturen, die in zwei Dimensionen nanoskalig sind (z. B. Nanodrähte, Nanoröhren und Nanogräben), Schichtstrukturen, die in nur einer Dimension nanoskalig sind, inverse Nanostrukturen, also Poren, sowie komplexe Strukturen wie z. B. supramolekulare Einheiten oder Dendrimere. Ohne Verfahren und Werkzeuge, mit denen die oben genannten Basisstrukturen hergestellt und analysiert werden können, wäre die Nanotechnologie nicht denkbar. Daher werden die damit assoziierten Technologien ebenfalls diskutiert.

Die Nanotechnologie erfordert einen hohen Grad an interdisziplinärer und transdisziplinärer Kooperation und Kommunikation. Dies liegt zum einen darin begründet, dass auf der Nanoebene Begriffswelten der Physik, Chemie und Biologie miteinander „verschmieren“, zum anderen darin, dass die Methoden einer einzelnen Disziplin durch Verfahren und Fachkenntnisse aus den anderen Fachrichtungen ergänzt werden können oder müssen.

III. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten Deutschlands im Bereich der Nanotechnologie im internationalen Vergleich

Dieses Kapitel enthält einen internationalen Vergleich der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Nanotechnologie anhand von bibliometrischen Daten und Patentindikatoren. Darüber hinaus wird ein Überblick über die entsprechenden Förderaktivitäten in Deutschland, durch die Europäische Union und in den USA gegeben. Es werden Ergebnisse eines Gutachtens des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung (FHG-ISI 2003) zusammengefasst. Dort wird auch die angewandte Methodik näher beschrieben.

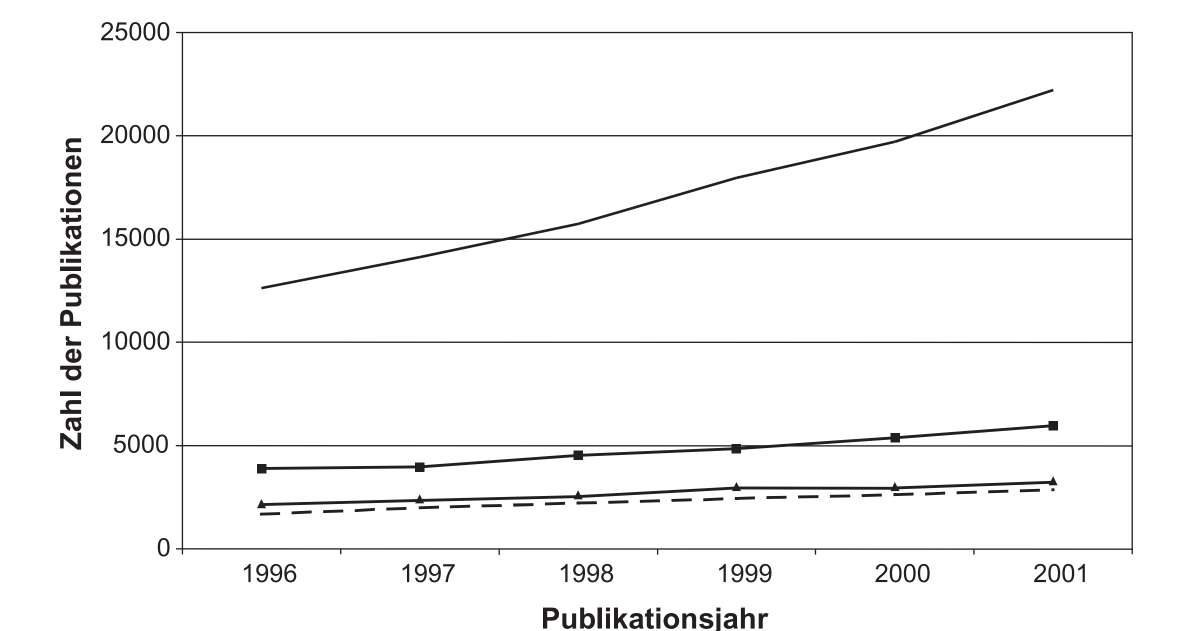
1. Internationaler Vergleich anhand bibliometrischer Daten

Die bibliometrischen Daten wurden unter Verwendung des Science Citation Index (SCI) gewonnen. Über den Zeitraum 1996 bis 2001 ist ein stetiges Wachstum der absoluten Publikationszahlen im Bereich der Nanotechnologie zu beobachten. Dies gilt für alle in die Untersuchung einbezogenen Länder. Auch der Anteil der Publikationen im Bereich der Nanotechnologie am gesamten Publikationsaufkommen in der Datenbank (SCI) nimmt in allen Ländern stetig zu.

Die publikationsstärksten Akteure in der Nanotechnologie sind die USA, gefolgt von Japan und Deutschland (Abbildung 11). Interessanterweise folgt auf Rang 4 be-

Abbildung 11

Die Top-3-Akteure im Bereich Nanotechnologie – Publikationen



Quelle: FHG-ISI 2003 (Daten: SCI via Host STN)

reits China (Abbildung 12). China ist auch das Land, in dem die Nanotechnologie den größten Anteil am gesamten Publikationsaufkommen ausmacht (Abbildung 13, S. 34). Im Jahr 2002 waren es bereits 7,7 %, während dieser Wert über alle Länder betrachtet bei 3,4 % liegt. Ebenfalls deutlich überdurchschnittliche und weiter wachsende Bedeutung wird der Nanotechnologie in Südkorea und Russland beigemessen, wobei Südkorea, gemessen am absoluten Publikationsaufkommen, noch nicht unter den Top 10 der aktivsten Länder erscheint, aber das bei weitem höchste jährliche Publikationswachstum aufweist (Tabelle 2). Deutschland liegt bezüglich des Anteils, den die Nanotechnologie am gesamten wissenschaftlichen Publikationsaufkommen hat, hinter Japan auf dem fünften Rang. Mit 4,7 % ist dieser Anteil noch deutlich höher als der internationale Durchschnittswert. Die USA hingegen weisen hier, trotz der führenden Rolle, die sie gemessen an den absoluten Publikationszahlen einnehmen, unterdurchschnittliche Werte auf.

In Europa sind hinter Deutschland Frankreich und Großbritannien die Länder mit dem größten Publikationsaufkommen. Auch in Frankreich nimmt die Nanotechnologie eine im internationalen Vergleich überdurchschnittliche Position ein. In Großbritannien hingegen liegt der Anteil der Nanotechnologie unter dem internationalen Durchschnitt. Überdurchschnittlich hingegen ist der Anteil der Nanotechnologiepublikationen in der Schweiz. Zu den aktivsten Ländern im Bereich Nanotechnologie gehören außerdem noch Spanien und Italien. Beide Länder liegen bezogen auf den Anteil, den die Nanotechnologie am gesamten Publikationsaufkommen einnimmt, in etwa gleichauf mit den USA.

Tabelle 2, S. 34, zeigt für den Zeitraum 1996 bis 2000 und für 19 Länder die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten der Publikationen im Bereich der Nanotechnologie einerseits und des gesamten in der Datenbank (SCI) erfassten wissenschaftlichen Publikationsaufkommens andererseits. Die größten Wachstumsraten bei den Publikationen im Bereich Nanotechnologie weisen Südkorea, China, Israel, Taiwan und Indien auf. Unter den europäischen Ländern erreichen die Niederlande, Schweden, Spanien und Frankreich die größten jährlichen Wachstumsraten. Der Wert für Deutschland entspricht dem internationalen Durchschnitt, der für die USA liegt deutlich darunter.

In allen betrachteten Ländern liegt die Wachstumsrate der Publikationen im Bereich Nanotechnologie deutlich über der Wachstumsrate des gesamten wissenschaftlichen Publikationsaufkommens.

Abbildung 12

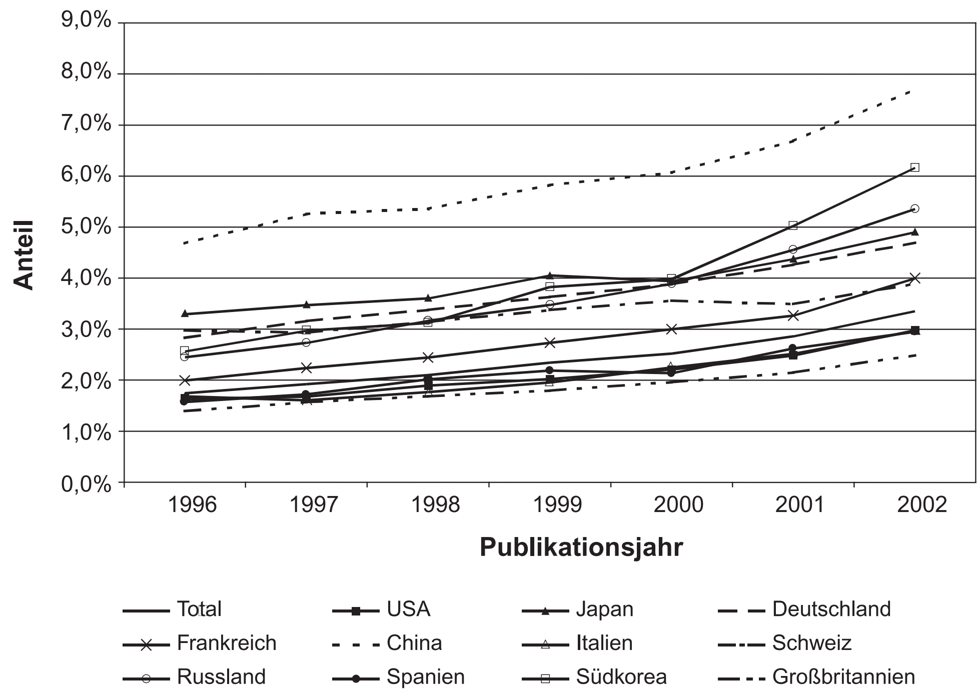
Die Top-4- bis 10-Akteure im Bereich Nanotechnologie – Publikationen

Quelle: FHG-ISI 2003 (Daten: SCI via Host STN)

Abbildung 13



Die Anteile des Publikationsaufkommens im Bereich Nanotechnologie im internationalen Vergleich



Quelle: FHG-ISI 2003 (Daten: SCI via Host STN)

Tabelle 2

Durchschnittliche Wachstumsraten 1996 bis 2000 – Publikationsaufkommen in %

	Nanotechnologie	**gesamt (laut SCI)**
Südkorea	***30,8***	***17,2***
China	***27,4***	***19,4***
Israel	***21,3***	***3,2***
Taiwan	***19,7***	***6,3***
Indien	***18,0***	***1,9***
Niederlande	***16,0***	1,6
Schweden	***14,5***	***2,1***
Spanien	***13,7***	***5,4***
Frankreich	***13,1***	***2,1***
Russland	***12,5***	0,2
Australien	***12,2***	***2,7***
Belgien	***11,9***	***2,5***
Deutschland	***11,8***	***3,3***
gesamt	***11,8***	***1,9***

noch Tabelle 2

	Nanotechnologie	gesamt (laut SCI)
Italien	*11,1*	***3,3***
Großbritannien	*10,7*	*1,6*
Schweiz	*8,6*	***3,8***
USA	*8,5*	*0,6*
Japan	*8,3*	***3,5***
Kanada	*7,1*	*– 0,1*

Quelle: FHG-ISI 2003, Berechnungen des ISI (Daten: SCI via Host STN)

2. Internationaler Vergleich anhand von Patentanmeldungen

Hauptgrundlage für diesen Teil der Analyse sind die Patentanmeldungen am Europäischen Patentamt (EPO). Wegen der hohen strategischen Bedeutung des europäischen Marktes auch für US-amerikanische Patentanmelder sind amerikanische Akteure in diesem Datenset gut repräsentiert. Berücksichtigt werden wegen ihrer zunehmenden Bedeutung auch so genannte PCT(=Patent Cooperation Treaty)-Anmeldungen. Die Daten wurden für den Zeitraum von 1996 bis 2000 erhoben.

Tabelle 3

Anteile der nanotechnologierelevanten Patentanmeldungen am gesamten Patentaufkommen 1996 bis 2000 in %

Land	1996 bis 2000
Russland	*1,7*
Kanada	*1,0*
Südkorea	*1,0*
Israel	*0,9*
Australien	*0,8*
USA	*0,8*
Schweiz	*0,8*
Frankreich	*0,8*
Deutschland	*0,7*
Belgien	*0,6*
gesamt	***0,6***
Großbritannien	*0,6*
Schweden	*0,5*
Niederlande	*0,4*
China	*0,4*
Japan	*0,4*
Spanien	*0,4*
Italien	*0,4*

Quelle: FHG-ISI 2003

Wie die Zahl wissenschaftlicher Publikationen nehmen auch die Patentanmeldungen im Bereich der Nanotechnologie im Untersuchungszeitraum stetig zu. Der Anteil der nanotechnologierelevanten Patentanmeldungen am gesamten Patentaufkommen lag bei durchschnittlich 0,6 % (Tabelle 3).

Deutlich über diesem Durchschnittswert lagen die Aktivitäten in Russland; hier waren 1,7 % aller Patentanmeldungen zwischen 1996 und 2000 nanotechnologierelevant. Ebenfalls überdurchschnittlich viele Patentanmeldungen gab es in Kanada und Südkorea. Unter den drei aktivsten Ländern (Abbildung 14) wiesen Deutschland und die USA leicht überdurchschnittliche Patentaktivitäten in der Nanotechnologie auf, für Japan lagen sie hingegen unter dem internationalen Durchschnittswert.

Zu den Top 10 in der Nanotechnologie (Abbildung 15) gehören auch bei den Patentanmeldungen Frankreich und Großbritannien. Die asiatischen Länder, die im Bereich der wissenschaftlichen Aktivitäten so prominent auftraten, fehlen hier jedoch. Neben den USA ist mit Kanada ein weiteres nicht europäisches Land unter den führenden Akteuren.

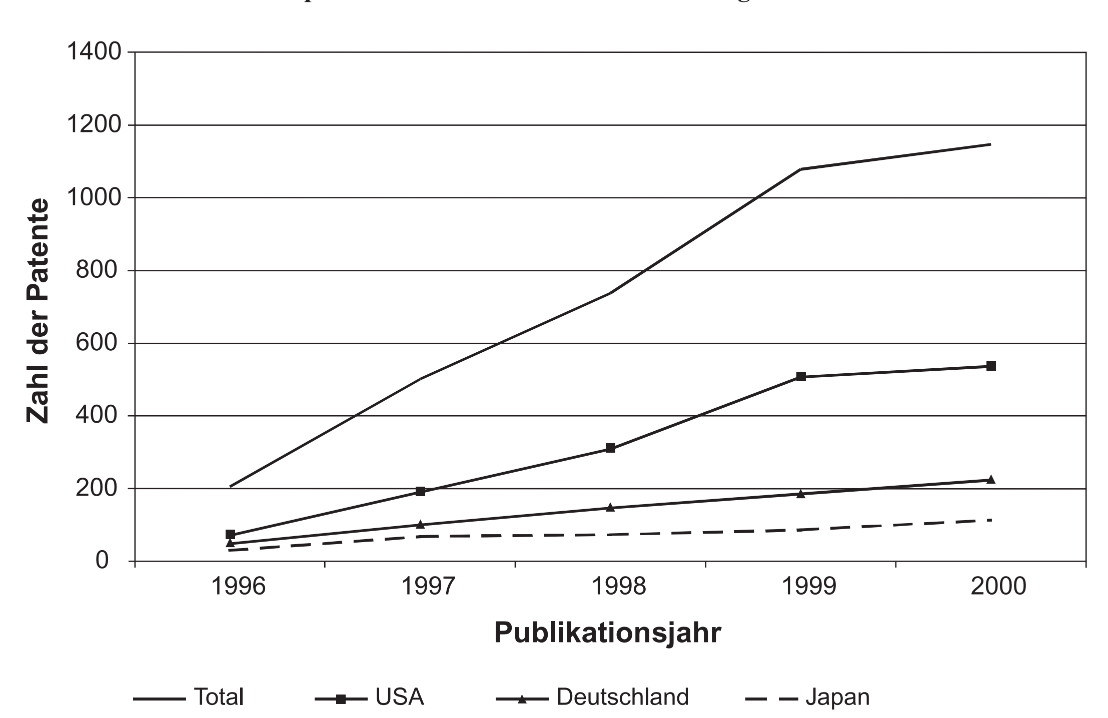
Wie Tabelle 4 zeigt, weist Kanada die größten jährlichen Wachstumsraten bei den nanotechnologierelevanten Patentanmeldungen auf. Allerdings ergeben sich diese hohen Wachstumsraten auch aufgrund der schwachen Ausgangsposition mit einer anfänglich sehr geringen Anzahl an Patentanmeldungen. Deutlich wird, dass die USA bemüht ist, ihre führende Position weiter auszubauen. Die für Deutschland ermittelte durchschnittliche Wachstumsrate liegt etwas unter dem internationalen Durchschnitt.

In allen betrachteten Ländern liegt die Wachstumsrate der nanotechnologierelevanten Patentanmeldungen deutlich über der Wachstumsrate der Patentanmeldungen insgesamt.

Abbildung 14



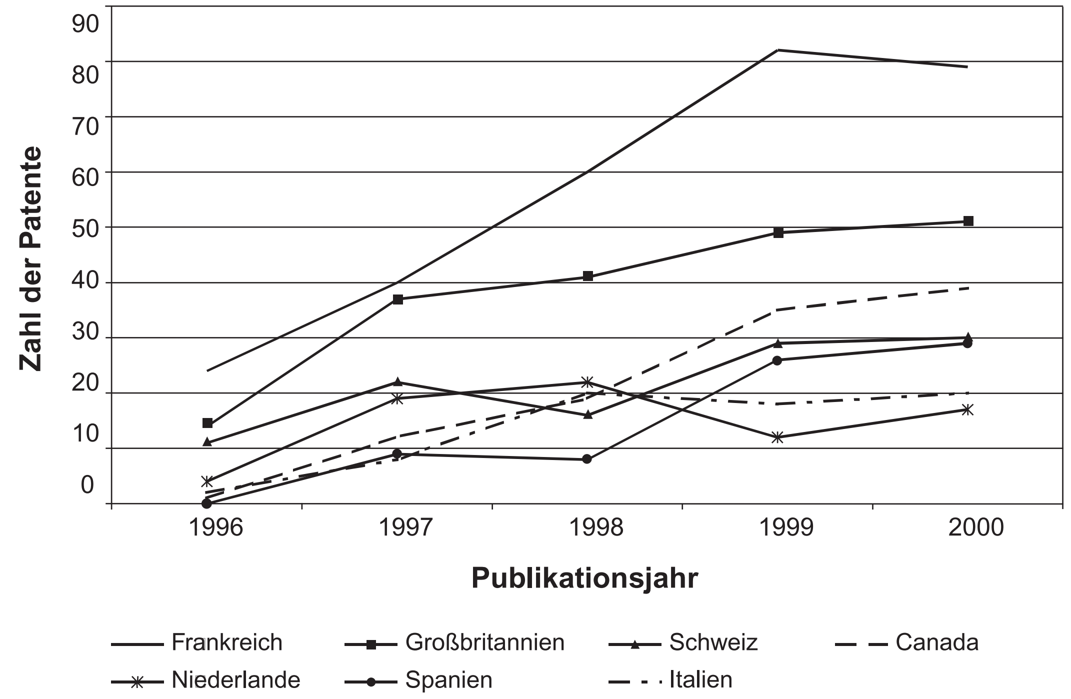
Die Top-3-Akteure im Bereich Nanotechnologie – Patente



Anmerkung: Daten für 2000 aufgrund der zeitlichen Verzögerung bei der Aufnahme in die Datenbanken noch nicht ganz vollständig.
Quelle: FHG-ISI 2003 (Daten: WPINDEX und PATDPA via Host STN)

Abbildung 15

Die Top-4 bis 10-Akteure im Bereich Nanotechnologie – Patente



Anmerkung: Daten für 2000 aufgrund der zeitlichen Verzögerung bei der Aufnahme in die Datenbanken noch nicht ganz vollständig.
Quelle: FHG-ISI 2003 (Daten: WPINDEX und PATDPA via Host STN)

Tabelle 4

Jährliche Wachstumsraten im Vergleich 1996 bis 2000 – Patentanmeldungen in %

	Nanotechnologie	**gesamtes Patentaufkommen**
Kanada	*149,9*	*31,4*
USA	*65,8*	*24,7*
Australien	*59,7*	*30,7*
gesamt	***53,6***	***22,5***
Deutschland	*46,2*	*18,2*
Japan	*39,3*	*19,7*
Großbritannien	*38,2*	*25,1*
Frankreich	*34,7*	*16,4*
Schweiz	*28,5*	*17,2*

Quelle: FHG-ISI 2003 (Daten: WPINDEX und PATDPA via Host STN)

3. Förderung der Nanotechnologie

3.1 Deutschland

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert die Nanotechnologie seit Beginn der 1990er-Jahre im Rahmen verschiedener Programme. Heute erfolgt die Förderung in den Fachprogrammen Informations- und Kommunikationstechnik, Materialforschung, Optische Technologien, Biotechnologie und Mikrosystemtechnik (BMBF 2002a). Gebündelt werden sollen die verschiedenen Aktivitäten des BMBF durch die Schirmbekanntmachung zur Nanotechnologie im Jahr 1999 (BMBF 1999).

In Tabelle 5 sind die durch das BMBF zur Verfügung gestellten Fördermittel für die Nanotechnologie insgesamt dargestellt. Tabelle 6 ordnet die BMBF-Fördermittel den entsprechenden Schwerpunktthemen zu.

Seit dem Jahr 2000 gibt es die Fördermaßnahme „Nanobiotechnologie“ (BMBF 2000). Über sechs Jahre sollen bis zu etwa 50 Mio. Euro für Forschungsarbeiten bereitgestellt werden. In der ersten Antragsrunde 2001 wurden 21 Projekte mit einem Volumen von insgesamt etwa 20 Mio. Euro bewilligt (BMBF 2001). Weitere sieben Projekte wurden in der zweiten Antragsrunde ausgewählt und werden mit ca. 7,5 Mio. Euro gefördert.

Tabelle 5

Förderung der Nanotechnologie durch das BMBF in Mio. Euro

Nanotechnologieförderung des BMBF (ab 2002 Sollzahlen)	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Verbundprojekte	27,0	31,1	32,7	52,0	86,7	110,6
Vernetzung durch Kompetenzzentren	0,6	1,6	2,1	2,1	1,8	1,5
Summe	27,6	32,7	34,8	54,1	88,5	112,1

Quelle: BMBF 2002b, S. 15

Tabelle 6

Förderung der Nanotechnologie durch das BMBF nach Schwerpunktthemen in Mio. Euro

Fachprogramme	2001	2002	2003
Nanomaterialien	23,5	23,9	29,1
Optische Technologien	12,6	17,0	17,6
Biotechnologie	1,3	8,5	9,6
Nanoelektronik	8,6	27,5	42,0
Kommunikationstechnologien	2,9	4,0	4,0
Produktionstechnologien	0,2	0,6	1,3
Mikrosystemtechnik	5,0	7,0	8,5
Summe	54,1	88,5	112,1

Quelle: BMBF 2002b, S. 16

Bereits seit 1998 gibt es die Förderinitiative „Kompetenzzentren Nanotechnologie“. Im Rahmen der Fördermaßnahme werden sechs, im Rahmen eines Wettbewerbs ausgewählte Zentren mit jeweils etwa 250 000 bis 350 000 Euro pro Jahr für fünf Jahre institutionell gefördert. Ein siebtes Zentrum, das sich mit Nanomaterialien beschäftigt, erhält keine institutionellen Fördermittel im Rahmen der Förderinitiative Kompetenzzentren.[3] Zusätzlich standen Mittel für die Projektförderung in Höhe von etwa 42 Mio. Euro (1998 bis 2001) zur Verfügung (Bührer et al. 2002, S. 3). Ziel dieser Förderung ist es „erfolgreiche institutionelle Netzwerkkonfigurationen im Bereich der Nanotechnologie einzurichten, durch welche eine selbsttragende Eigendynamik im Zusammenspiel innovationsrelevanter Akteure mit nachhaltigen wirtschaftlichen Effekten im globalen Wettbewerb initiiert wird“ (Bührer et al. 2002, S. 5). An den Kompetenzzentren sind jeweils Großunternehmen, KMUs, Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen beteiligt.

Im Jahr 2002 hat das BMBF einen Nachwuchswettbewerb im Bereich Nanotechnologie ins Leben gerufen (BMBF 2002c). Ziel dieser Initiative ist die Errichtung von Nachwuchswissenschaftler-Gruppen in der Nanotechnologie an universitären oder außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Für diese Fördermaßnahme sollen für einen Zeitraum von fünf Jahren ca. 75 Mio. Euro zur Verfügung gestellt werden (BMBF 2002a). Bis Mitte 2003 wurden die Förderanträge von 17 Gruppen mit einem Gesamtvolumen von ca. 30 Mio. Euro zur Durchführung empfohlen.

Neben dem BMBF fördert auch das Ministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) Aktivitäten im Bereich der Nanotechnologie. Insgesamt 6 Mio. Euro stellte das BMWA für die Projektförderung im Jahr 2001 zur Verfügung (BMBF 2002b).

Weiterhin sind verschiedene Institute der Max-Planck-Gesellschaft (MPG), der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) und der Wissensgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz (WGL) in der nanotechnologischen Forschung aktiv. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) fördert unter anderem Sonderforschungsbereiche auf dem Gebiet der Nanotechnologie. Fördermittel, die durch die institutionelle und DFG-Förderung in die Nanotechnologie fließen, sind in Tabelle 7 wiedergegeben.

Insgesamt wurden im Jahr 2001 für die Nanotechnologie 153,1 Mio. Euro öffentliche Fördermittel bereitgestellt. Für 2002 wird von einer Steigerung auf knapp 200 Mio. Euro ausgegangen (BMBF 2002b, S. 18).

[3] Nanoanalytik, Funktionalität durch Chemie (NanoChem), Erzeugung und Einsatz lateraler Strukturen (NanoClub), Anwendungen von Nanostrukturen in der Optoelektronik (NanOp), Ultradünne funktionale Schichten (UFS), Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung (UPOB) und Materialien in der Nanotechnologie (NanoMat).

Tabelle 7

Institutionelle und DFG-Förderung der Nanotechnologie im Jahr 2001 in Mio. Euro

institutionelle Förderung	Gesamtsumme	davon öffentliche Mittel	davon Industrieanteil
DFG	27,0	25,2	1,5
MPG	14,3	13,6	0,7
FhG	8,5	4,4	4,1
WGL	25,4	17,8	7,6
HGF	31,8	26,0	5,8
andere (caesar, PTB)	5,7	5,7	0,0
Summe	112,7	92,7	19,7

Quelle: BMBF 2002b, S. 17

3.2 Europäische Union

Auf europäischer Ebene wurden bereits im 4. Rahmenprogramm (1994 bis 1998) ca. 80 Projekte im Bereich Nanotechnologie gefördert (European Commission 2002). Insgesamt geht man von einem Fördervolumen von 90 bis 95 Mio. Euro aus.

Im 5. Rahmenprogramm (1998 bis 2002) entfielen jährlich etwa 45 Mio. Euro auf die Nanotechnologie. Ein spezifisches Programm zur Förderung der Nanotechnologie gab es weder im 4. noch im 5. Rahmenprogramm. Die Förderung im 5. Rahmenprogramm erfolgte sowohl im Rahmen der vier thematischen als auch der drei Querschnittsprogramme. Einen spezifischen thematischen Fokus gab es hierbei nicht, vielmehr wurde die Nanotechnologie thematisch breit verfolgt.

Im 6. Rahmenprogramm (2002 bis 2006) gibt es einen spezifischen Schwerpunkt im Bereich Nanotechnologie – Thematic Priority Area 3: „Nanotechnology and Nanoscience, knowledge-based multifunctional materials and new production processes and devices“. Ein Schwerpunkt innerhalb dieses Themenbereiches wird die Nanobiotechnologie sein. Insgesamt sollen für die Thematic Priority Area 3 allein 1,3 Mrd. Euro an Fördermitteln bereitgestellt werden, das entspricht etwa 7,5 % der insgesamt zur Verfügung stehenden Fördermittel (European Commission 2002). Es ist weiter davon auszugehen, dass auch im Rahmen anderer thematischer Schwerpunktbereiche nanotechnologierelevante Themen bearbeitet werden, sodass der Anteil der auf die Nanotechnologie entfallenden Mittel nochmals steigt.

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die im Jahre 2001 in Europa insgesamt verausgabten öffentlichen Fördermittel für die Nanotechnologie. Auf Deutschland entfiel mehr als die Hälfte der öffentlichen Mittel, die im EU-Raum insgesamt für die Nanotechnologie bereitgestellt wurden, was die Bedeutung, die der Nanotechnologie in Deutschland beigemessen wird, deutlich unterstreicht. In den meisten europäischen Ländern gibt es keine spezifischen Fördermaßnahmen im Bereich Nanotechnologie, diese ordnen sich vielmehr in die allgemeinen FuE-Fördermaßnahmen ein (Companó 2000, S. 16).

3.3 USA

Auch in den USA wird der Nanotechnologie sehr große Bedeutung beigemessen. Ihr kommt höchste Priorität innerhalb der FuE-Förderung zu. Ausdruck dessen ist das im Januar 2000 erstmals aufgelegte Nationale Nanotechnologie-Programm – die National Nanotechnology Initiative (NNI) (Roco 2001b). Die Mittel der Bundesförderung gehen aus Tabelle 9 hervor. Eine deutliche Zunahme der Aufwendungen ist nach der Auflegung des Nanotechnologie-Programms zu beobachten. Alle in Tabelle 9 genannten Bundeseinrichtungen sind in die NNI einbezogen.

Tabelle 8

Nanotechnologieförderung 2001 in Europa in Mio. Euro

	öffentliche Mittel
EU	50
Staaten der EU ohne Deutschland	94
Deutschland	153
Summe	297

Quelle: BMBF 2002b, S. 19

Tabelle 9

Nanotechnologieförderung in den USA – Bundesebene in Mio. US-Dollar

	1997	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	**2003****
NSF	65		85		150	199	221
DOD	32		70		110	180	201
DOE	7		58		93	91	139
NIST	4		16		10*	38	44
NASA	3		5		20	46	51
NIH	5		21		39	41	43
Sonstige						10	11
total	116	190	255	270	422	605	710

* ohne ATP;
** angefordert
Quelle: Roco 2001a u. b und 2002a, b u. c

Etwa 70 % der im Rahmen der NNI zur Verfügung stehenden Mittel sollen der universitären Forschung und Entwicklung zugute kommen (NSTC 2000, S. 13).

Im Rahmen der NNI-Förderung wurden u. a. besonders langfristig ausgerichtete Forschungsaktivitäten (Grand Challenges) definiert. Im Rahmen dieser Grand Challenges arbeiten die verschiedenen Fördereinrichtungen zusammen. Für die Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften sind beispielsweise folgende dieser Grand Challenges besonders relevant (NSTC 2000, S. 47 ff.):

– Advanced Healthcare, Therapeutics and Diagnostics
– Nanoscale Processes for Environmental Improvement
– Bio-nanosensor Devices for Communicable Disease and Biological Threat Treatment
– National Security

Im Rahmen der NNI wurden außerdem Centers of Excellence gegründet. Sechs „Nanoscale Science and Engineering Centres“ wurden von der NSF an Universitäten eingerichtet, wobei es sich um kooperative Einrichtungen über Universitätsgrenzen hinweg handelt. Diese Zentren erhalten über einen Zeitraum von fünf Jahren insgesamt 65 Mio. US-Dollar für Forschung und Bildung. Folgende Zentren wurden eingerichtet (The Institute of Nanotechnology 2002a):

– Columbia University Center for Electronic Transport in Molecular Nanostructures (10,8 Mio. US-Dollar)
– Cornell University Center for Nanoscale Systems in Information Technologies (11,6 Mio. US-Dollar)
– Harvard University Center for the Science of Nanoscale Systems and their Device Application (10,8 Mio. US-Dollar)
– Northwestern University Center for Integrated Nanopattering and Detection Technologies (11,1 Mio. US-Dollar)
– Rensselaer Polytechnic University Center for Directed Assembly of Nanostructures (10 Mio. US-Dollar)
– Rice University Center for Biological and Environmental Nanotechnology (10,5 Mio. US-Dollar)

Weiterhin wird durch die National Science Foundation (NSF) das Nanobiotechnologie-Zentrum an der Cornell University (NBTC) gefördert, welches ebenfalls eine universitätenübergreifende Einrichtung ist (Segelken 1999).

An sieben Universitäten richtet die NASA „Research, Engineering and Technology Institutes“ (URETI) ein zur Bearbeitung von Themen aus dem Bereich der Nanotechnologie (Beispiele: bio-nano materials and structures for aerospace vehicles; nanoelectronics and computing). Diese Institute werden ebenfalls zunächst über einen Zeitraum von fünf Jahren gefördert und erhalten pro Jahr ca. 3 Mio. US-Dollar.

Insgesamt ist festzustellen, dass in den USA seit dem Jahr 2000 die Aktivitäten im Bereich der Nanotechnologie deutlich verstärkt und ausgedehnt wurden. Die NNI soll langfristig angelegte Forschung und Entwicklung in der Nanotechnologie befördern. Die Aktivitäten richten sich auf eine breite Palette möglicher Anwendungsbereiche. Sie reichen von Materialien und Produktion, Nanoelektronik, über Medizin und Gesundheit, Umwelt und Energie, chemische und pharmazeutische Industrie, Biotechnologie und Landwirtschaft bis hin zu Informations- und Kommunikationstechnologien und Themen der Nationalen Sicherheit. Verschiedenste Akteure sind in die NNI integriert, und ein Spektrum von verschiedenen Förderinstrumenten wurde etabliert. Dazu gehören: Förderung der Grundlagenforschung, Festlegung langfristig orientierter Grand Challenges, Gründung von Centers of Excellence und der Aufbau einer geeigneten Forschungsinfrastruktur (NSTC 2000).

4. Zusammenfassung

Der internationale Vergleich der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten anhand von bibliometrischen Daten und Patentindikatoren zeigt die starke Position Deutschlands im Bereich der Nanotechnologie.

Deutschland gehört zu den publikationsstärksten Akteuren in der Nanotechnologie und wird hier nur von den USA und Japan übertroffen. Auf Rang 4 folgt China. In Europa sind hinter Deutschland Frankreich und Großbritannien die Länder mit dem größten Publikationsaufkommen. Bezüglich des Anteils, den die Nanotechnologie am gesamten wissenschaftlichen Publikationsaufkommen hat, liegt Deutschland an fünfter Stelle, hinter China, Südkorea, Russland und Japan, aber deutlich über dem internationalen Durchschnitt. Die größten Wachstumsraten bei den Publikationen im Bereich der Nanotechnologie weisen Südkorea, China und Israel auf; der Wert für Deutschland entspricht dem internationalen Durchschnitt, der für die USA liegt deutlich darunter.

Bei den Patentanmeldungen liegt Deutschland auf Platz 2, hinter den USA, aber vor Japan. Es folgen Frankreich und Großbritannien. Anders als beim Publikationsaufkommen zählt China hier nicht zu den Top-10-Akteuren. Der Anteil der nanotechnologierelevanten Patente am gesamten Patentaufkommen liegt in Deutschland leicht über dem internationalen Durchschnitt, die jährlichen Wachstumsraten der Patentanmeldungen sind allerdings leicht unterdurchschnittlich. In allen betrachteten Ländern liegt die Wachstumsrate der nanotechnologierelevanten Patentanmeldungen deutlich über der Wachstumsrate der Patentanmeldungen insgesamt.

Für die deutsche Forschung gilt es, diese starke Position im Bereich der Nanotechnologie zu behaupten und möglichst weiter auszubauen. Hierzu werden erhebliche Anstrengungen unternommen. Von zentraler Bedeutung ist dabei die seit Anfang der 1990er-Jahre bestehende Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, die von ca. 35 Mio. Euro im Jahre 2000 auf über 88 Mio. Euro in 2002 angewachsen ist und die 2003 auf 112 Mio. Euro steigen soll. Seit 1998 gibt es die Förderinitiative „Kompetenzzentren Nanotechnologie“ und seit 2002 einen Nachwuchswissenschaftler-Wettbewerb im Bereich Nanotechnologie. Auch das Bundesministerium

für Wirtschaft und Arbeit und die Deutsche Forschungsgemeinschaft sind an der Förderung der Nanotechnologie beteiligt. Die Max-Planck-Gesellschaft, die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren und die Wissensgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz setzen beträchtliche Mittel für die Weiterentwicklung der Nanotechnologie ein. Insgesamt wurden im Jahre 2002 öffentliche Mittel in Höhe von ca. 200 Mio. Euro für die Nanotechnologie eingesetzt, gegenüber ca. 150 Mio. Euro in 2001.

Damit entfiel auf Deutschland mehr als die Hälfte der öffentlichen Mittel, die im EU-Raum für die Nanotechnologie bereitgestellt wurden.

IV. Überblick über wichtige Anwendungsfelder der Nanotechnologie

In diesem Kapitel werden zunächst neuartige Eigenschaften nanotechnologischer Produkte und Verfahren beschrieben (Kapitel IV.1). Es folgt eine Übersicht über wichtige Anwendungsfelder solcher Produkte und Verfahren (Kapitel IV.2) – ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Die Ausführungen basieren im Wesentlichen auf Gutachten des Fraunhofer-Instituts für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (FhG-INT 2003) und des VDI (VDI/FhG-INT 2002).

1. Neuartige Eigenschaften von nanotechnologischen Produkten und Verfahren

Die Verkleinerung von Abmessungen in den Nanometerbereich hinein führt oft zu charakteristischen, für neue Anwendungen nutzbaren Eigenschaften von Stoffen und Werkstoffen, die bei makroskopischen Stücken des gleichen Materials nicht auftreten. Dazu gehören z. B. deutlich höhere Härte, Bruchfestigkeit und -zähigkeit bei niedrigen Temperaturen sowie Superplastizität bei hohen Temperaturen, die Ausbildung zusätzlicher elektronischer Zustände, hohe chemische Selektivität der Oberflächenstrukturen und eine deutlich vergrößerte Oberflächenenergie.

Durch den kontrollierten Aufbau makroskopischer Körper aus atomaren und molekularen Bausteinen lassen sich deren Eigenschaften gezielt einstellen. Darüber hinaus eröffnet das Verständnis der molekularen Grundlagen neuer Materialien Perspektiven für die Herstellung neuer „schaltbarer“ Werkstoffe, die mit konventionellen Methoden nicht herstellbar sind.

Mechanische Funktionalitäten

Die wichtigsten, deutlich verbesserten mechanischen Eigenschaften nanostrukturierter Festkörper (z. B. Nanokomposite) sind höhere Härte, Bruchfestigkeit und -zähigkeit bei niedrigen Temperaturen einerseits sowie Superplastizität bei hohen Temperaturen andererseits. Die Nanostrukturierung von Oberflächen und oberflächennahen Bereichen kann sich dabei positiv auf das tribologische Verhalten der betreffenden Werkstücke auswirken. Die Ursachen für die verbesserten mechanischen Eigenschaften sind noch nicht vollständig geklärt. Verschiedene Modelle führen diese Effekte auf drei wesentliche Faktoren zurück. Bei Verkleinerung der Korngröße

– werden stoffspezifische Größen erreicht, unterhalb derer im Korn selbst keine plastischen Verformungsmechanismen mehr ablaufen können, sodass die Härte- und Bruchfestigkeitswerte in die Nähe des theoretischen Maximalwertes für diesen Stoff gelangen können;
– werden die Wege im Gefüge, die ein Riss zur Zerstörung eines Bauteils durchlaufen muss, länger;
– greift die Korngrenzenverfestigung in Nanodimensionen eher als bei größeren verfügbaren Volumina.

Die Superplastizität bei hohen Temperaturen beruht im Wesentlichen auf thermisch aktiviertem Korngrenzengleiten im Zusammenspiel mit sich gegenseitig geometrisch kaum behindernden Nanopartikeln. Dadurch lassen sich z. B. auch hochtemperaturstabile Werkstoffe wie Siliziumnitrid- oder Aluminiumoxid-Keramiken bei Temperaturen deutlich unterhalb des makroskopischen Versagens- bzw. Schmelzpunktes mechanisch umformen.

Geometrische Besonderheiten

Nanostrukturen liegen in der Größenordnung des Raumbedarfs von Atomen und Molekülen. Anwendungsoptionen sind z. B. mit atomarer Genauigkeit einstellbare Porengrößen in nanoporösen Membranen sowie Volumenkörpern als Voraussetzung von atom- bzw. molekülspezifischer Separationstechnik, selektiver Katalyse und Wirt-Gast-Strukturbildung.

Durch das extrem große Oberfläche/Volumen-Verhältnis nanoporöser und nanopartikulärer Materialien wird ihr Verhalten häufig von Oberflächen- bzw. Grenzflächenprozessen dominiert (z. B. Ladungstrennung, chemische Umsetzungen oder Veränderung elektronischer Eigenschaften durch Adsorption). Häufig lassen sich solche Prozesse, die auch schon bei konventionellen Materialien auftreten, erst mit nanostrukturierten Materialien technisch nutzen. Beispielsweise kann sich aufgrund der Nanorauigkeit einer Oberfläche deren Benetzungsverhalten verändern.

Elektrische Funktionalitäten

Die elektrischen Eigenschaften von Materialien ergeben sich aus deren elektronischer Bandstruktur. Die Verkleinerung von Partikelgrößen und Schichtdicken in den unteren Nanometerbereich hinein führt zur Ausbildung zusätzlicher elektronischer Zustände, so genannter Quantenpunkt- und Quantentrogzustände. Aufgrund der größeren Oberfläche wird der Beitrag von elektronischen Oberflächenzuständen zu den elektronischen Eigenschaften bedeutsamer. Die energetische Lage der Quantentrog- und Quantenpunktzustände lässt sich über die Abmessungen der Nanostrukturen in weiten Bereichen einstellen. Quantenpunktzustände verhalten sich nicht wie Festkörperzustände, sondern wie atomare bzw. molekulare

elektronische Zustände. Deshalb werden Quantenpunkte gelegentlich auch als künstliche Atome oder Nanoatome bezeichnet.

Weiterhin ist im Nanobereich die Quantelung der elektrischen Ladung[4] von Bedeutung, die bei herkömmlichen elektronischen Bauelementen eine untergeordnete Rolle spielt. Im Nanometerbereich wirkt sich eine Änderung der Freien Energie – die mit der Übertragung (Aufnahme bzw. Abgabe) eines einzelnen Elektrons zu bzw. von einem Quantenpunkt verbunden ist – signifikant aus. Der Elektronentransport erfolgt durch so genannte Tunneln[5].

Magnetische Funktionalitäten

Zu den magnetischen Eigenschaften von Festkörpern gehören Paramagnetismus und Ferromagnetismus. Durch die Verringerung der Größe ferromagnetischer Domänen lassen sich makroskopische magnetische Eigenschaften (z. B. Sättigungsmagnetisierung[6], Remanenz[7]) beeinflussen. Durch die geometrische Form der Grenzflächen von Nanokristalliten können außerdem Form und Anzahl der magnetischen Domänen beeinflusst werden. Sehr kleine Nanokristallite weisen nur noch eine magnetische Domäne auf. Mit sinkender Domänengröße verringert sich die für Umklappprozesse der Magnetisierungsrichtung erforderliche Energie. Wird diese kleiner als die thermische Energie der Umgebung (i. d. R. bei < 20 nm), so tritt Paramagnetismus auf, der hier als Superparamagnetismus bezeichnet wird.

Molekulare Magnete sind metallorganische Verbindungen (meist mit Mangan, Eisen, Cobalt, Nickel oder Lanthanoiden), die ungepaarte Elektronen aufweisen. Letztere koppeln über die langreichweitige so genannte Superaustausch-Wechselwirkung, was zu ferro-, ferri- oder antiferromagnetischem Verhalten führt. Bekannt sind punkt-, ring-, ketten- und schichtförmige sowie dreidimensional vernetzte molekulare Magnete.

Wichtig sind verschiedene Magnetwiderstandseffekte[8] (MR-Effekte), deren Nutzungsmöglichkeiten unter dem Sammelbegriff XMR-Technologien zusammengefasst werden. Hierbei oft benannte Effekte sind der

– GMR-Effekt (Giant Magnetoresistance),
– TMR-Effekt (Tunnelling Magnetoresistance),
– EMR-Effekt (Extraordinary Magnetoresistance) und
– BMR-Effekt (Ballistic Magnetoresistance).

Optische Funktionalitäten

Da Nanopartikel deutlich kleiner sind als die Wellenlänge sichtbaren Lichtes, tritt an ihnen keine Reflexion auf. Dispersionen von Nanopartikeln aus sonst undurchsichtigem Material können daher transparent erscheinen. Nanopartikel können allerdings Streueffekte verursachen, bei denen kürzere Wellenlängen stärker als längere abgelenkt werden, was zu Farbeffekten führen kann. Über das Maßschneidern von Quantentrog- bzw. Quantenpunktzuständen lässt sich dagegen ganz spezifisch ein scharf begrenzter Wellenlängenbereich (eine Farbe) einstellen, in dem das Material Licht absorbiert oder emittiert. Die Farbe von Nanomaterialien – genau genommen die Wellenlänge von absorbiertem oder emittiertem Licht – lässt sich daher in weiten Bereichen frei wählen.

Die klassischen Methoden der miniaturisierten Optik sind physikalisch begrenzt (so genanntes Abbe-Limit[9]). Dieses Limit kann in metallischen Nanostrukturen umgangen werden. Bei nanoskopischen Metallteilchen erfolgt eine schmalbandige Absorption und Lichtstreuung, wobei die spektrale Lage der Resonanzfrequenz von diversen Eigenschaften der Nanopartikel (elektronische Eigenschaften des Metalls, der Partikelform etc.), dem Abstand zu eventuellen Nachbarpartikeln sowie der Dielektrizitätskonstante des umgebenden Mediums abhängig ist. Durch Verändern einzelner Parameter wie auch durch die Partikelform ist es möglich, die optischen Eigenschaften der Nanopartikel maßzuschneidern.

Chemische Funktionalitäten

Die chemischen Eigenschaften von Festkörpern werden wesentlich durch ihre Oberflächenstruktur bestimmt: Nanostrukturierte Materialien weisen einen besonders großen Anteil an Oberflächenatomen sowie von Atomen an Kanten und Ecken auf. Solche Atome sind aufgrund ihrer ungesättigten Bindungen besonders reaktiv.

Mit einer Nanostrukturierung sind darüber hinaus oft Gitterverspannungen bzw. verzerrte Bindungswinkel und damit eine erheblich vergrößerte Oberflächenenergie verbunden. Dies hat u. a. Einfluss auf eine bei Nanopartikeln häufiger beobachtete erhöhte Sinteraktivität – v. a. von

---

[4] Ein Quant ist die kleinste Einheit einer physikalischen Größe, die ein System aufnehmen oder abgeben kann.

[5] Elektronen können nur durch Tunnelübergänge auf Quantenpunkte gelangen oder diese verlassen (so genanntes Ein-Elektronen-Tunneln). Sind die auf einem Quantenpunkt vorhandenen Zustände besetzt, tritt eine so genannte Coulomb-Blockade auf, d. h. das Tunneln ist erst bei größerer Spannung in höherenergetische Zustände wieder möglich. Erfolgt der Elektronentransport zeit- bzw. ortskorreliert, spricht man von Coulomb-Oszillationen. Schon länger bekannt ist der so genannte Josephson-Effekt, der bei schwacher Kopplung zweier Supraleiter, bei der die Supraleiter z. B. nur durch eine wenige Nanometer dicke Isolationsschicht getrennt sind, auftritt. Dann führt das Tunneln von so genannten Cooper-Paaren – den Trägern des Stroms in Supraleitern – u. a. zu einem Stromfluss ohne Spannung oder bei Anlegen einer Spannung zu Stromoszillationen. In so genannten Supraleitenden Quanteninterferometern (SQUIDs = Superconducting Quantum Interference Devices) wird die Abhängigkeit des Josephson-Stromes von einem äußeren Magnetfeld zur Magnetfeldmessung genutzt.

[6] Sättigungsmagnetisierung ist die durch äußere magnetische Felder erreichbare maximale Magnetisierung.

[7] Remanenz steht für Restmagnetisierung des Materials (z. B. nach Abschalten eines Magnetfeldes).

[8] Durch Streuung von Elektronen beim Transport in Abhängigkeit vom Magnetfeld ändern sich die Widerstände des Systems.

[9] Abbe-Limit: Die Ausbreitung von Lichtwellen in optischen Elementen, die kleiner als die halbe Lichtwellenlänge sind, ist aufgrund von Beugung nicht möglich.

metallisch und ionisch aufgebauten Stoffen – und führt zu veränderten zwischenmolekularen Wechselwirkungen. Genutzt werden kann dies unter anderem, um Oberflächen mit maßgeschneidertem Benetzungsverhalten zu erzeugen.

Darüber hinaus kann die spezifische räumliche Anordnung und die Bindungsselektivität von funktionellen Gruppen genutzt werden, um im Sinne einer molekularen Erkennung Strukturen mit biologischen Funktionalitäten zu erhalten.

Zur chemischen Reaktivität und Selektivität tragen auch hier die o. g. elektronischen Quantentrog- und Quantenpunktzustände bei. Über eine gezielte Stoffauswahl und Einstellung von Teilchengrößen lassen sich Selektivität und Reaktivität, aber auch chemische Stabilität gegenüber möglichen Reaktionspartnern hochgenau einstellen. Dies wird bereits in der Katalyse chemischer Reaktionen genutzt, lässt sich aber auch bei der gezielten Synthese von Wirt-Gast-Strukturen nutzen.

Biologische Funktionalitäten

Unter biologischen Funktionalitäten nanoskaliger Materialien wird hier primär die Nutzung von deren Wechselwirkung mit komplexen biologischen (also lebenden) Systemen wie Zellen und Organismen verstanden. Die Wechselwirkung von Zelloberflächen mit technischen Oberflächen wird wesentlich durch deren Rauigkeit und Strukturierung im Mikro- und Nanometerbereich bestimmt. Dies kann z. B. genutzt werden, um Zellen in bestimmte geometrische Anordnungen zu bringen.

Für eine Interaktion von künstlich hergestellten Nanopartikeln mit dem lebenden Organismus sind dabei u. a. folgende Effekte interessant:

– In Abhängigkeit von ihrer Größe und ihrer Oberflächenbeschaffenheit (Krümmungsradius, Ladungsverteilung etc.) können Nanopartikel membrangängig sein oder biologische Strukturen wie Membranen zerstören.

– Aufgrund ihrer Abmessungen sind v. a. kleine Nanopartikel biologisch adressierbar und können so zielgerichtet in biologische Prozesse eingeschleust oder gegenüber dem Immunsystem maskiert werden.

– Es gibt Anhaltspunkte dafür, dass die Größe der Nanopartikel ein Kriterium für ihre Verweildauer im Körper von Lebewesen ist.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Nutzung der biologischen Funktionalität von Nanostrukturen in selbstorganisierten Prozessen. Ein Beispiel hierfür sind selbstorganisierte Peptid-Nanoröhren, die sich in Zellmembranen einbauen, so für deren Durchlässigkeit sorgen und auf diese Weise Mikroorganismen töten können.

2. Anwendungsfelder nanotechnologiebasierter Produkte und Verfahren

Im Folgenden wird auf konkrete Nutzungen der aufgeführten Funktionalitäten eingegangen. Die Zuordnung der aufgeführten Beispiele erfolgt nach der im Vordergrund stehenden Zielgröße. Da zumeist mehrere Eigenschaften und Funktionalitäten betroffen sind, ist die Zuordnung nicht immer eindeutig.

2.1 Oberflächenfunktionalisierung und -veredelung

Für viele Anwendungen sind die Eigenschaften der Materialoberflächen bestimmend, die sich häufig durch geeignete Beschichtung gezielt verändern lassen. Unter marktrelevanten Aspekten befindet sich die Nanotechnologie in diesem Bereich bereits in einem relativ fortgeschrittenen Stadium.

Verbesserte mechanische Eigenschaften und tribologische Schutzschichten

Nanomultischichten und Nanoverbundschichten, die aus Hartstoffen wie den Nitriden, Carbiden und Carbonitriden von Titan, Wolfram und Silizium oder aus Aluminiumoxid zusammengesetzt sind, befinden sich bereits in der industriellen Anwendung. Weitere Eigenschaftsverbesserungen erhofft man sich durch Nanokomposite von Zirkonnitrid oder Metalloxiden mit geringen Metallbeimischungen. Tribologische Schutzschichten finden Einsatz in der Produktionstechnik sowie dem Maschinen- und Fahrzeugbau für Umform-, Schneid- und Stanzwerkzeuge sowie für Lager.

Mit Nanopartikeln können auch die Eigenschaften von Schmierstoffen verbessert werden. So werden bereits Kupferpartikel in Schmieröl zur Verringerung des Motorverschleißes eingesetzt. Fullerene haben ebenfalls ein Potenzial als Schmierstoffe. Auch an einem selbstschmierenden Hartlack wird gearbeitet, der Molybdändisulfid-Nanokristalle enthält.

Die Härte von gängigen Hartstoffschichten – wie Metallnitriden und -carbiden – lässt sich durch Nanostrukturierung weiter erhöhen. Nanoskalige Vielfachschichten führen dann zu einer erheblichen Erhöhung der Härte, wenn die einzelnen Schichten große Unterschiede im Elastizitätsmodul aufweisen. Aber auch durch nanodisperse Heterogefüge in Nanoverbundschichten lässt sich eine extrem hohe Härte erreichen. Dazu werden z. B. nitridische Nanokristalle in eine amorphe Matrix eingebettet. Je höher dabei der Anteil an Nanokristallen (typischerweise etwa 80 %) und je größer der Unterschied im Elastizitätsmodul der Materialien ist, desto härter ist die Schicht (Patscheider 2002, Schultrich 2002).

Anorganisch-organische Hybridpolymere (so genannte organisch modifizierte Keramiken) sind als Kratzschutzbeschichtung vor allem für Polymer- und Metalloberflächen geeignet. Darüber hinaus weisen sie geringe optische Streuverluste auf, weshalb sie auch zum Schutz transparenter Materialien (z. B. Brillengläser) genutzt werden. Weiterhin lassen sich ihre Benetzungseigenschaften von hydrophil bis hydrophob in einem weiten Bereich einstellen.

Nanostrukturierte Gefüge lassen sich mit Kohlenstoff auch aus einem einzigen Stoffsystem erzeugen. Ein Beispiel sind homogene und atomar glatte Schichten aus amorphem Kohlenstoff (teilweise mit Wasserstoff dotiert), deren Bindungsform zum Teil graphitartig und zum Teil diamantartig ausgebildet ist. Aufgrund seiner Eigenschaften wird dieses Material als diamantartiger Kohlenstoff (Diamond-like Carbon, DLC) bezeichnet. Die niedrigen Abscheidetemperaturen ermöglichen auch die Beschichtung von temperaturempfindlichen Werkstoffen. Über die Variation der Abscheidebedingungen lässt sich der Gehalt an diamantartig gebundenem Kohlenstoff sowie der an Wasserstoff in weiten Grenzen steuern. Durch periodische Variation dieser Bedingungen können nanoskalige Vielfachschichten (wenige nm) mit periodisch variierendem Diamantcharakter hergestellt werden, die neben einer großen Härte eine hohe Bruchzähigkeit aufweisen. Solche Vielfachschichten lassen sich ohne Qualitätseinbuße und bei guter Substrathaftung mit einer für viele technische Anwendungen erforderlichen Dicke im Bereich einiger Mikrometer erzeugen (Robertson 2002; Schultrich 2002).

Ein praktisches Beispiel für ultradünne Einfachschichten aus DLC sind Kohlenstoff-Topschichten auf Computer-Festplatten. Diese sollen vor zufälligem Kontakt des Schreib-Lese-Kopfes schützen. Die Kohlenstoff-Topschicht ist derzeit ca. 7 nm dick und soll für die nächste Festplatten-Generation dünner als 3 nm mit einer Rauigkeit kleiner als 1 nm über die gesamte Festplattenoberfläche werden. Ein anderes Beispiel sind superharte Nanokompositschichten aus reinem Kohlenstoff, die für eine Anwendung als Feldemissionskathoden Interesse finden.

Weitere Beispiele für Oberflächenbeschichtungen sind:

– mechanische Schutzschichten aus nanostrukturierten Oxiden (z. B. Siliziumdioxid) auf weichen, flexiblen Materialien, wie Holz, Papier, Textilien oder Polymeren (Böttcher 2002);

– nanoskalige Polymerschichten mit tribologischen Eigenschaften als Gleitbeschichtung im Alpinsport, aber auch für Anti-Graffiti- und Anti-Fouling-Anwendungen (Naß 2002);

– mehrere, mittels einer ultradünnen Polymerschicht aufeinandergeklebte Fensterscheiben mit einer hohen Widerstandsfähigkeit gegen Schlageinwirkung;

– Beschichtung von Rasiermesserspitzen zur Erhöhung der Lebensdauer mittels Nanosolen[10] (Anselmann 2001 u. 2002; Universität Groningen 1997).

[10] Durch Verwendung von Nanosolen ist es möglich, keramische Schutzschichten per Tintenstrahldrukker aufzudrucken oder dreidimensionale Körper schichtweise aufzuwachsen (Rapid Prototyping). Das Nanosol wird schichtweise auf das Substrat aufgedruckt und mithilfe eines Laserstrahls getrocknet und gesintert. Der Prozess wird auch als „Stereostiction“ bezeichnet.

Thermische und chemische Schutzschichten

Thermische und thermomechanische Schutzschichten werden z. B. im Bereich der Luftfahrt für Turbinen- und Motorenbauteile benötigt. Hier kommen Nanokomposite oder ultradünne Schichten unter Verwendung nichtoxidischer Keramiken, Mullitbasiskeramiken und intermetallischer Verbindungen zum Einsatz.

Wärmedämmende Fensterscheiben lassen sich beispielsweise durch den Einschluss von Glas- oder Keramik-Aerogelen zwischen zwei Glasscheiben herstellen. Die Nanoskaligkeit der Aerogelporen führt dabei zur gewünschten Transparenz des Materials.

Als chemische Schutzschichten, z. B. zum Korrosionsschutz von Oberflächen in aggressiven Medien, können dünnste Schichten von Titancarbid, Titancarbonitrid und anderen chemisch inerten Materialien dienen. Nanoskalig hergestellt sind solche Schichten transparent, zeigen eine hohe mechanische Flexibilität und benötigen nur sehr wenig Material.

Diffusionsschutzschichten sind etwa für die Verhinderung der Gasdiffusion durch Behälterwände von Bedeutung. Beispielsweise wird in PET-Flaschen das Austreten von Gasen durch ultradünne Beschichtungen mit Silizium- oder Titandioxid sowie diamantartigem Kohlenstoff verhindert. Hier sind zusätzlich Transparenz, Lebensmittelverträglichkeit und hohe mechanische Flexibilität der Beschichtung wichtig.

Für sonstige Lebensmittelverpackungen werden ebenfalls derartige Komposite, z. B. mit nanoskaligen Siliziumdioxidpartikeln, sowie ultradünne Schichten aus organisch modifizierten Keramiken entwickelt. Tonpartikelverstärkte Polymere befinden sich als Lebensmittelverpackungen bereits in der Anwendung. Solche nanoskaligen Verbundmaterialien – wie nanopartikelverstärkte Polymere, die einerseits wie Polymere form- und extrudierbar sind, andererseits thermische und mechanische Eigenschaften besitzen, die zwischen denen von organischen Polymeren und anorganischen Keramiken liegen – besitzen ein hohes Einsatzpotenzial.

Für Kraftfahrzeugtanks werden mit Silikat-Nanopartikeln gefüllte Polymere untersucht, um die Kraftstoffverluste aufgrund von Diffusion durch die Tankwand zu minimieren. Dies geschieht durch eine erhebliche Verlängerung der Diffusionspfade des Gases.

In Computerchips spielen Diffusionsschutzschichten seit der Einführung von Kupfer als Leitermaterial eine entscheidende Rolle. Das Eindiffundieren des Kupfers in das Silizium wird durch eine ultradünne Trennschicht aus Titannitrid verhindert.

Benetzungsverhalten

Das Benetzungsverhalten spielt für den Schutz von Fassaden, Fahrzeugen, Textilien, Solarzellen etc. vor Verschmutzung eine wichtige Rolle. So genannte selbstreinigende Oberflächen weisen gleichzeitig hydrophobe und oleophobe Eigenschaften auf. Realisierbar ist dies durch ultradünne Schichten aus fluorierten oder mit langkettigen

Kohlenwasserstoffresten versehenen Silikonen. Entsprechende Rauigkeit dieser Schicht führt sogar zu superhydrophoben und superoleophoben (so genannte ultraphoben) Oberflächen.

Mögliche Anwendungen sind u. a.

– Textilien, die mit Silikonschichten versehen werden, was gleichzeitig ihre Verschleißfestigkeit erhöht (Böttcher 2002);

– wasser- und schmutzabweisende Außenhautflächen aus fluoralkylhaltigen Silanen, welche sich z. B. für PKW-Scheiben und -Spiegel in der Entwicklung befinden;

– „selbstreinigendes“ Architekturglas mit nanorauen, ultraphoben Zirkondioxidschichten, welches hohen Anforderungen an die Transparenz (durch geringe optische Streuverluste) genügt (Duparré 2002);

– Tintenstrahldruckerpapiere sowie -folien, die durch den Einsatz amorpher Nanopartikel aus Kieselsäure oder gemischten Oxiden (z. B. Siliziumdi- und Aluminiumoxid) eine gute Haftung und schnelle Absorption der Tintentropfen aufweisen (bei hoher Transparenz z. B. photorealistische Ausdrucke) (Pridöhl 2002).

Das Benetzungsverhalten bestimmter Oberflächen lässt sich über einen weiten Bereich einstellen. Ein Beispiel ist die Dotierung von amorphem diamantartigem Kohlenstoff mit geeigneten Elementen (z. B. Fluor, Silizium) unter verschiedenen Reaktionsbedingungen. Ein anderes Beispiel sind Elastomere, die mit fluorierten Kohlenwasserstoffen superhydrophob beschichtet werden können (Genzer 2002). Die Superhydrophobie wird erreicht durch eine verbesserte Packungsdichte der Moleküle in der aufgebrachten Schicht (Mechanically Assembled Monolayers, MAMs).

Biozide Beschichtungen

Biozide bzw. antibakterielle Oberflächen werden für Lebensmittelverpackungen, im Holzschutz und für medizinische Geräte benötigt. Dabei kommen hauptsächlich drei Wirkprinzipien zur Anwendung:

– Die Schicht selbst entfaltet antibakterielle Wirkung. Ein Beispiel hierfür sind ultradünne Schichten aus Polyethylenglykol. Diese Schichten sind zudem noch flexibel und eignen sich daher z. B. für Langzeitkatheter und Verpackungen. Biozide Polymerbeschichtungen können außerdem auf Textilien aufgebracht werden.

– Nanoporöse Oxidschichten (z. B. Siliziumdioxid) werden mit einer bioziden Substanz (z. B. Silber) imprägniert. Das Biozid wirkt, indem es durch die Nanoporen kontrolliert über einen längeren Zeitraum abgegeben wird (Böttcher 2002).

– Die biozide Wirkung erfolgt durch Wasserstoffperoxid-Radikale, die photokatalytisch gebildet werden. Die Beschichtung erfolgt mit Oxid-Nanopartikeln, die als Photokatalysator wirken und bei (UV-)Lichteinfall und in Gegenwart von Feuchtigkeit reaktive Radikale bilden.

Optisch-funktionale Oberflächen

Optisch-funktionale Oberflächen für Fassaden, Kraftfahrzeuge, Solarzellen etc. lassen sich mittels nanobasierter Materialien verwirklichen. Beispielsweise lässt sich zur Entspiegelung eine nanoporöse Siliziumdioxid-Schicht aufbringen. Solarreflektierende Multilayer-Interferenzbeschichtungen als Sonnenschutzverglasung sowie Antireflexbeschichtungen für Instrumententafeln werden in PKWs bereits eingesetzt.

Schaltbare transparente (elektrochrome) Beschichtungen lassen sich mit dünnen Schichten aus nanokristallinem Wolframtrioxid, ggf. kombiniert mit leitfähigen Polymeren, realisieren. Solche Schichten finden bereits für abblendbare Autorückspiegel Verwendung, die elektrisch gesteuert die Reflektionseigenschaften des Spiegels an den Lichteinfall anpassen.

Für Displays wird auch diskutiert, diese mit selbstleuchtenden elektrochromen Farbstoffen auszustatten, die ihre Farbe bei Variation der angelegten Spannung verändern. Durch Anwendung nanostrukturierter Schichten und -partikel können die Schaltzeiten der Farbstoffe optimiert werden.

Interessant ist weiterhin die elektrochemische Integration derartiger Schichten in transparente Farbstoff-Solarzellen, sodass die Spannungsversorgung für die elektrochrome Schicht durch die Lichtenergie geliefert wird, sobald ein Abdunkelungsbedarf entsteht (Peter 2001).

Der Wirkungsgrad der meisten Solarzellen hängt stark von ihrer Temperatur ab. Damit die Solarzelle nicht vom Licht photovoltaisch nicht nutzbarer Wellenlängenbereiche aufgeheizt wird, sind spektral selektive Eintrittsfenster erwünscht. Dies wird durch eine Beschichtung mit Silber-Nanopartikeln erreicht (Joerger et al. 2000).

Die Lichtstabilität von Farbstoffen kann durch Einbettung nanopartikulärer Pigmente in Metalloxidschichten erhöht werden. Deren Absorption, Reflexion und Lumineszenz lässt sich auf diese Weise einstellen. Nutzbar ist dies für Materialoberflächen und für Textilien zum Färben, Dekorieren und als UV-Schutz (Böttcher 2002).

Oberflächen mit besonderen elektrischen Eigenschaften

Für Touch-Screen-Displays, für antistatische Verpackungs- und Gehäusematerialien, aber auch für die Scheibenbeheizung in Kraftfahrzeugen werden transparente, elektrisch leitende Schichten benötigt. Diese lassen sich durch Beschichten mit nanokristallinem Zinkoxid oder durch Einbettung von Nanokristallen elektrisch leitender Oxide wie Indium-Zinn-Oxid in eine Polymermatrix herstellen (Pridöhl 2002).

Zum Schutz gegen elektrostatische Entladungen werden transparente Beschichtungen aus organisch modifizierten Keramiken mit eingebetteten Kohlenstoffnanoröhren entwickelt, die drei Eigenschaften miteinander verbinden: die gute Verarbeitbarkeit von Polymeren, die Härte keramischer Werkstoffe und die elektrische Leitfähigkeit der Kohlenstoffnanoröhren.

Eine Reihe von nanobasierten Materialien wird auf ihre Mikrowellenabsorptionseigenschaften und damit ihre Eignung als Radar-Tarnbeschichtungen untersucht. Hier kommen Kohlenstoffnanoröhren-Polymer-Verbunde, Nanokomposite von Mischoxiden verschiedener Übergangsmetalle in Polymermatrix sowie so genannte Cenosphären infrage. Letztere sind poröse, keramische Hohlkugeln, die von einer nanoskaligen Metallschicht bedeckt sind und ein Abfallprodukt der Hüttenindustrie darstellen (Gedon/Faber 2000).

Lacke und Kleber

Lacke, Schutzanstriche und Kleber stellen eigenständig vermarktbare Produkte dar. Zielgrößen sind verbesserte optische und Benetzungseigenschaften. Durch die Integration von Nanopartikeln in konventionelle Lacke ergeben sich neue und verbesserte, nanobasierte Farbeffekte:

- In hochwertigen schwarzen Lacken befinden sich Pigmentruße aus agglomerierten Nanopartikeln bereits in der Anwendung.
- Ein Farbtonverschiebungseffekt hin zum Blau – d. h. eine verstärkte Reflektivität im blauen Be-reich – wird durch den Zusatz von kristallinen Titandioxid-Nanopartikeln zu Buntpigmenten erreicht (Winkler/Proft 2002).
- Ein Perlglanzeffekt ergibt sich durch Interferenzen beispielsweise bei mit nanoskaligen Übergangsmetalloxid-Schichten beschichteten natürlichen Schichtsilikaten (Glimmer) und synthetischen Siliziumdioxid-Plättchen.
- Beim Frosteffekt – bei dem der Lack senkrecht betrachtet gelblich und schräg betrachtet blau erscheint – werden dem Lack dispergierte Rutil-Nanopartikel und Metallicpigmente zugesetzt. Das Licht wird an den Nanopartikeln gestreut (blaues Licht wird am stärksten abgelenkt) und anschließend an den Metallicpigmenten reflektiert.
- Opaleszierende Farben lassen sich durch monodisperse Kugeln aus Siliziumdioxid, die auch als Träger für Nanopartikel oxidischer Farbpigmente dienen können, erzeugen. Derartige monodisperse Kern-Schale-Systeme sind leichter zu dispergieren als trägerfreie Nanopartikel, die zur Agglomeration neigen. Kern-Schale-Partikel aus Polymeren sind in der Entwicklung u. a. für opaleszente Folien und für Lacke mit verbessertem Fließverhalten.

Durch Zusatz nanoskaliger pyrogener Kieselsäure[11] erhält man Lacke mit erhöhter Kratzfestigkeit, deren Fließeigenschaften über den Nanopartikelgehalt optimal auf die Verarbeitungsform (Streichen, Spritzen) eingestellt werden können. Auch Klebstoffe können auf diese Weise bezüglich ihrer Fließeigenschaften optimiert werden (Pridöhl 2002). Die Fließeigenschaften von Tauchlacken für die Elektronikindustrie werden mittels Bariumsulfat-Nanopartikeln verbessert (Sachtleben 2003). Bei der Verarbeitung von Lacken per elektrostatischer Sprühlackierung werden elektrisch leitfähige Lacke benötigt, wofür der Zusatz von Kohlenstoffnanoröhren untersucht wird.

Transparente und gleichzeitig selbstreinigende Lackoberflächen lassen sich mit organisch modifizierten Keramiken verwirklichen (Benetzungsverhalten, Kratzschutzbeschichtungen). Über schaltbare bzw. in der Farbe veränderbare Lacke (elektrochrom, photochrom, thermochrom) und selbstheilende Lacke wird diskutiert. Derartige Entwicklungen befinden sich jedoch noch in einem frühen Stadium. Multifunktionale, schaltbare Materialien werden auch als Smart Materials bezeichnet.

Zu letzteren gehören auch Klebstoffe, die mit magnetischen Nanopartikeln modifiziert sind, wobei deren Hafteigenschaften von außen gesteuert werden können. Der Kleber wird elektromagnetisch aufgeheizt; die thermische Energie bewirkt ein Abbinden via chemische Reaktionen oder ein thermisches Aufschmelzen.

2.2 Katalyse, Chemie und Werkstoffsynthese

In der chemischen Industrie geht es im weitesten Sinne um die Erhöhung der Ausbeuten und die Verbesserung der Selektivität chemischer Reaktionen in zumeist gängigen Verfahren und Prozessen. Dabei weist die Katalyse[12] eine herausragende Stellung auf. Sie wird – im Zusammenhang mit katalytischen Nanopartikeln – im Folgenden gesondert behandelt. Aber auch neue Synthesewege erscheinen mithilfe der Nanotechnologie möglich (z. B. durch Nanoreaktoren). Darüber hinaus sind auch oberflächenaktive Membranen, nanoporöser Filter und Adsorptionsmittel aus nanotechnologischer Sicht optimierbar.

Katalytisch wirksame Nanopartikel

Der verbesserte Katalysatoreffekt von Nanopartikeln, -pulvern, -schichten und nanoporösen Materialien beruht im Wesentlichen auf der extrem großen Oberfläche im Verhältnis zum Volumen dieser Materialien. Aufgrund des großen Anteils an Oberflächenatomen kann das Katalysatormaterial besser ausgenutzt werden.

Im Nanobereich werden auch völlig neue Materialien als Katalysatoren erschlossen. Beispielsweise ist elementares Gold als kompakter Festkörper katalytisch inaktiv, jedoch sind Gold-Nanopartikel mit wenigen Nanometern Durchmesser aufgrund ihrer anders gearteten elektronischen Struktur aussichtsreiche Katalysatoren für eine ganze Reihe technisch wichtiger Umsetzungen (Haruta/Daté 2001).

---

[11] Pyrogene Kieselsäure ist die Bezeichnung für auf dem Wege der Flammenpyrolyse hergestellte Kieselsäure.

[12] Durch Katalyse wird die Geschwindigkeit einer Reaktion durch den Zusatz eines Stoffes – den Katalysator – erhöht, der sich nicht verbraucht. Dadurch verändern sich der notwendige Energieeinsatz und die Spezifik der Reaktion (u. a. weniger unerwünschte Nebenprodukte). Differieren Aggregatzustand des Katalysators und der Reaktanten, spricht man von heterogener, andernfalls von homogener Katalyse.

Ein weiteres Beispiel sind Autoabgaskatalysatoren, in denen bereits seit Jahren Nanopartikel – bestehend aus Platin, Rhodium und Palladium, die zusammen mit Promotoren (Zirkondioxid, Seltenerdoxide) auf keramischen oder metallischen Trägern aufgebracht sind – genutzt werden. Hier erhofft man sich durch Nanopartikel aus Übergangsmetallcarbiden, -oxycarbiden oder aus Silber einen Ersatz der teuren Platinmetalle. Darüber hinaus wird darüber nachgedacht, dem Kraftstoff direkt katalytische Nanopartikel zuzusetzen, damit bereits bei der Verbrennung weniger Schadstoffe entstehen. Einen ähnlichen Effekt könnte möglicherweise eine katalytisch wirksame Nanobeschichtung der Zylinderwände im Motor haben (Vollrath 2002).

Photokatalytische Reaktionen sind an halbleitenden Nanopartikeln – z. B. Titandioxid (auskristallisiert in Anatas-Struktur), Zinksulfid, Cadmiumsulfid – möglich, deren Eigenschaften für neuartige Synthesen genutzt werden könnten. Mit neuen Katalysatoren, wie nanostrukturierten Eisentitanat-Dünnfilmen, gelingt u. a. die photokatalytische Fixierung von Luftstickstoff als Nitrat (Kisch/Macyk 2002).

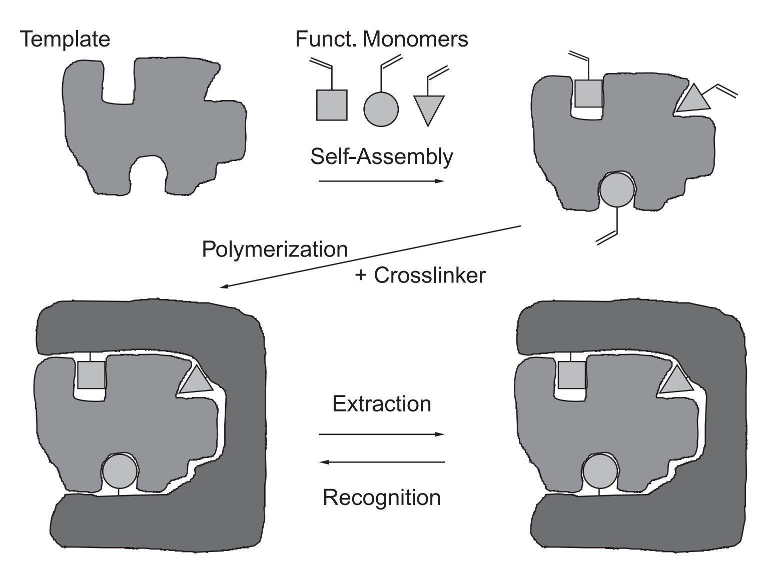
Zur Wasseraufbereitung sowie zur Beseitigung von Umweltgiften und Pharmaabfällen werden bereits Titandioxid-Nanopartikel eingesetzt. Dabei werden unter Lichteinwirkung aus Wasser und Sauerstoff Hydroxyl-Radikale gebildet, die toxische Stoffe sowie Mikroorganismen zerstören.

Sonstige neue und weiterentwickelte Katalysatoren

Durch molekulares Prägen (Molecular Imprinting) gelingt der Aufbau spezifischer Oberflächen und Hohlräume in organischen und anorganischen Polymeren. Das „molekulare Abformen“ eines Moleküls (Templat) erfolgt durch Selbstorganisation geeigneter funktionalisierter Ligandenmoleküle und anschließende Vernetzung und Entfernung des abgeformten Moleküls (Abbildung 16). Diese Polymere zeigen eine hohe Selektivität für das abgeformte Molekül (molekular geprägte Polymere, Molecularly Imprinted Polymers, MIPs). Durch den Einbau katalytisch aktiver Zentren, z. B. von Metallatomen, können durch molekulares Prägen biomimetische, d. h. der Natur nachgeahmte, enzymanaloge Katalysatoren gewonnen werden. Vorteile gegenüber Enzymen liegen neben niedrigeren Herstellungskosten in ihrer Einsetzbarkeit bei anderen Reaktionsbedingungen (höhere Temperaturen etc.) sowie mit in lebenden Zellen nicht vorkommenden Reagenzien. Das molekular geprägte Material kann dabei als Granulat mit Partikelgrößen im Mikrometerbereich, als Oberflächenbeschichtung oder als Membran, bzw. in eine Trägermembran eingebaut, verwendet werden (Brüggemann 2001; Locatelli et al. 1998; Ulbricht et al. 2002; Vidyasankar/Arnold 1995).

Abbildung 16

Prinzip des molekularen Prägens („Molecular Imprinting“)



Erläuterung: Das prägende Molekül (Templat) bildet mit geeignet funktionalisierten Molekülen ein Supermolekül. Durch Zugabe und Polymerisation von (organischen oder anorganischen) Netzwerkbildnern wird der molekulare Abdruck gewonnen, der nach Entfernen des Templatmoleküls durch molekulare Erkennung die gewünschte hohe Selektivität aufweist.
Quelle: Brüggemann 2001

In anderen Fällen geht es oft um die nanotechnologische Verbesserung bereits verfügbarer Katalysatoren. Dies trifft etwa auf eine verbreitete Gruppe von Katalysatoren, die Zeolithe[13] (so genannte Molekularsiebe) zu. Der Durchmesser der Zeolith-Poren liegt im Nanometerbereich (ca. 0,4 bis 1,2 nm) und damit in der Größenordnung vieler chemisch interessanter Moleküle. In jüngster Zeit sind künstliche Zeolithe mit Porengrößen bis 50 nm zugänglich geworden (so genannte „mesoporöse Molekularsiebe“) (Tomkiewicz 2000; Trong On et al. 2001). Innerhalb der Poren existiert ein starkes elektrisches Feld, welches zusammen mit der elektronischen Begrenzung der eingelagerten bzw. adsorbierten Moleküle deren katalytische Aktivierung bewirkt.

Darüber hinaus wird auch nach neuen heterogenen Katalysatoren gesucht. Diese Suche erfolgte bisher oft anhand empirischer Faustregeln und anschließendem experimentellen Austesten. Durch die Entwicklung der Nanoanalytik ist in den letzten Jahren ein verbessertes Verständnis von Funktion und Beschaffenheit katalytisch aktiver Zentren gewonnen worden. Unter Einbeziehung moderner Computersimulationsmethoden wird es in Zukunft verstärkt möglich sein, heterogene Katalysatoren für gewünschte Reaktionen maßzuschneidern. Dieser eher indirekte Nutzen der Nanotechnologie für die Katalyse spielt auch eine Rolle bei der Aufklärung von Reaktionsverläufen.

Ein Beispiel hierfür ist die weitere Aufklärung atomar ablaufender Prozesse bei der heterogen katalysierten, industriell wichtigen Synthese von Styrol (Vorstufe von Polystyrol). Hier geht man mittlerweile davon aus, dass der bisher genutzte Katalysator (Kalium-Eisenoxid) lediglich als Ko-Katalysator arbeitet und die eigentliche katalytische Reaktion an gebildeten graphitischen Kohlenstoffpartikeln abläuft – die bisher als „unerwünschte“ Ablagerung galten. Alternativ könnte auch gezielt eine andere Modifikation des Kohlenstoffs – Fullerene – eingesetzt werden. Mit mehrschichtigen kugelförmigen Fullerenen (so genannte Kohlenstoff-Nanozwiebeln) wurde ein neuer nanoskaliger Katalysator maßgeschneidert, der einen anderen Reaktionsweg bei erheblich niedrigerer Temperatur und deutlich höherer Ausbeute erlaubt (MPG 2002).

Nanoskalige Katalysatorträger

Zeolithe sind auch als nanoporöse Trägermaterialien für katalytisch aktive Metall- und Oxid-Nanopartikel einsetzbar, wodurch Trägerkatalysatoren mit neuen Eigenschaften zugänglich werden. Solche Strukturen eignen sich u. a. als Träger für immobilisierte (gebundene) Homogenkatalysatoren und Enzyme. Zudem sind sie aufgrund ihrer ausgeprägten Symmetrie beispielsweise für chiral-selektive Umsetzungen (rechts- oder linksdrehender Moleküle) mit Katalysatoren einsetzbar. Dabei wird der Katalysatorträger zum Teil des reaktiven Komplexes.

Weitere nanoporöse Trägermaterialien, die auch auf ihre Eignung für Autoabgaskatalysatoren untersucht werden, sind Aerogele[14] und keramische Membranen aus gemischten Metalloxiden. Auch nanoporöse Metall- oder Polymermembranen sowie künstliche Opale aus monodispersen Siliziumdioxidkugeln können als Katalysatorträger dienen. Weiterhin ist es möglich, durch Interkalation[15] voluminöser Moleküle oder Ionen in Schichtstrukturen wie Tone nanoskalige Hohlräume zu schaffen, sodass derartige Materialien ebenfalls als Katalysatorträger infrage kommen.

Weiterhin werden als nanoskalige Trägermaterialien für Katalysatorpartikel bekannte Polymere und Dendrimere[16] (für so genannte „Wirt-Gast-Strukturen“) untersucht, die ein kontrolliertes Aufwachsen der Katalysatorpartikel und damit eine präzise Kontrolle der Katalysatoreigenschaften erlauben. Die Selektivität dieser Katalysatoren wird dadurch erhöht. Bei Dendrimeren wird insbesondere beim Einbau im Inneren der „baumartigen“ Struktur eine enzymähnliche molekulare Erkennung beim Eindiffundieren der Substratmoleküle ermöglicht (Reek et al. 2002).

Membranen und nanoporöse Filter

Ein weiteres Anwendungsfeld für die Nanotechnologie in der chemischen Industrie stellen Membranen und Filter z. B. zur Abwasseraufbereitung, Schadstoffbeseitigung und Nebenproduktabtrennung dar. Verwendet werden anorganische Strukturen, wie die bekannten nanoporigen Zeolithe, sowie maßgeschneiderte Polymermembranen. Nanostrukturierte Membranen arbeiten hierbei wesentlich effizienter als herkömmliche Filtersysteme. Nanofiltrationstechniken könnten zukünftig auch in der Trinkwasserversorgung eingeführt werden. Ein weiteres Anwendungsfeld wird in der Verbesserung von Membranen für Brennstoffzellen gesehen (vgl. Kapitel IV.2.3).

Im Fahrzeugbereich werden nanoporöse Filtersysteme zur Minimierung von Partikelemissionen im Nanometerbereich anvisiert. Neuere Dieselmotorkonzepte führen zwar zu einer Verringerung der Emission von Rußpartikeln insgesamt, jedoch zu einer Erhöhung der Emission nanoskaliger Rußpartikel. Hierfür werden zukünftig nanoporöse Partikelfilter entwickelt, die diese aus dem

---

[13] Zeolithe sind kristalline Alumosilikate mit einem dreidimensionalen Netzwerk von Poren (Kanäle und Hohlräume). Sie weisen dadurch eine vergleichsweise große innere Oberfläche auf und können entsprechende Mengen an Molekülen adsorbieren. Die Adsorptionseigenschaften der aktiven Zentren der inneren Oberfläche können gezielt eingestellt werden. Die wohldefinierte Porenstruktur führt zu einer hohen Selektivität, sowohl bezüglich der umzusetzenden Stoffe als auch bezüglich Übergangszuständen und Produkten.

[14] Ein Aerogel besteht aus einer starren, vorgeformten und nicht quellbaren Matrix, die auch bei Austrocknung ihre Porosität behält (z. B. poröses Kieselgel, poröses Glas). Bei den Aerogelen wird als Dispersionsmittel Luft eingesetzt. Die gebildeten Hohlräume können untereinander zusammenhängen oder abgeschlossen sein.

[15] Interkalation bezeichnet die Einlagerung eines Gastmoleküls zwischen angeordneten Strukturen (z. B. Aufnahme von Wasser durch Tone).

[16] Dendrimere sind Makromoleküle mit besonders geordneten Strukturen („baumartig verzweigte“ Wachstumsformen) und zumeist unpolarer Atombindung. Sie sind im Nanobereich insbesondere für neue Wirt-Gast-Strukturen interessant geworden.

Abgas zurückhalten und ggf. anschließend katalytisch verbrennen.

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz nanoporöser Membranen zur Schadstoffbeseitigung ist die Immobilisierung von Biokatalysatoren. Dabei werden Enzyme und Mikroorganismen an makromolekularen Trägermaterialien fixiert, die als Biofilter (so genannte Biocere) zum Abbau von Schad- oder Geruchsstoffen aus Abgasen und Wasser eingesetzt werden. Beispielsweise werden Biocere mit einer spezifischen Metallbindungsaktivität (z. B. für Uran) für die Beseitigung von Altlasten im Gebiet der ehemaligen Wismut AG der DDR bereits genutzt. Für schwermetallhaltige Abwässer wurden Filter entwickelt, die aus porösem Siliziumdioxid bestehen, auf dem sich metallbindende Proteine oder auch lebende Bakterien befinden, die Schwermetalle auf ihrer Oberfläche anlagern (FhG-ISST 1999). Biocere vereinigen daher die Eigenschaften von keramischen und biologischen Materialien (FZR 2002).

Für das Filtrieren mit Membranen, deren nanoskalige Poren nur für kleine, nicht jedoch für große Moleküle oder Nanopartikel durchlässig sind, hat sich die Bezeichnung Ultrafiltration etabliert. Solche Membranen, die im Allgemeinen aus Polymeren bestehen, werden in der chemischen Industrie, in der Wasseraufbereitung, Lebensmittelindustrie sowie Biotechnologie eingesetzt.

Nanoreaktoren

Nanoreaktoren ermöglichen eine völlig neue Art der räumlichen Prozesskontrolle im Nanometermaßstab. Ein Beispiel dafür sind Dendrimere. Die Permeabilität der (atomaren) Wände, die Polarität des Innenraums, die im Innenraum herrschende Mikroviskosität sowie der zur Einkapselung zur Verfügung stehende Raum bewirken die Selektivität für den Zugang von Reaktionspartnern zum im Nanoreaktor befindlichen Katalysator. Eine erhöhte Aktivität wird durch die erzwungene räumliche Nähe zwischen den an der Reaktion beteiligten Atomen sowie ggf. durch schnellen Ausstoß von nicht im Inneren des Nanoreaktors löslichen Reaktionsprodukten bewirkt. Dendrimere stellen „unimolekulare Mizellen“[17] dar. Weitere Nanoreaktoren sind aus Lipid- oder Blockcopolymermolekülen aufgebaute Mizellen und Liposomen, Nanokapseln aus Polyelektrolytmolekülen und hohle Proteinkompartimente.

Die unterschiedliche Polarität von Mizellen im Innen- und Außenraum (z. B. wässrig gegenüber organisch) könnte in aus ihnen bestehenden Mikroemulsionen zu einer erheblichen Verbesserung von Zweiphasen-Katalyse-Reaktionen führen. Die Grenzfläche zwischen wässriger und organischer Phase ist in Mikroemulsionen extrem groß (bis zu 0,1 km^2 pro Liter), sodass ein Einsatz von toxischen und teuren Phasentransfer-Katalysatoren verzichtbar wird. Cyclodextrine[18] könnten als biokompatible Phasentransfer-Katalysatoren Verwendung finden, sind jedoch noch zu teuer in der Herstellung (Miyagawa 2002; Orlich 2000).

Entsprechend geformte Moleküle, wie z. B. Kronenether[19], Calixarene[20] oder Cyclodextrine, bilden in Gegenwart geeigneter Gastmoleküle supramolekulare Wirt-Gast-Strukturen, die ebenfalls als Nanoreaktoren genutzt werden können. Solche molekularen Kapseln verändern die chemischen und physikalischen Eigenschaften ihrer Gastmoleküle signifikant. Beispielsweise können in freier Lösung instabile Moleküle darin stabilisiert werden. Dadurch eröffnen sich neue Synthesewege in der organischen Chemie.

Die Wirtsmoleküle (molekulare Kapseln) in Wirt-Gast-Strukturen können auch selber als Katalysator wirken. Die Reaktionspartner werden dabei durch lokalen Einschluss in räumliche Nähe gezwungen. Weist das Reaktionsprodukt eine deutlich niedrigere Affinität zur molekularen Kapsel auf, wird es abgestoßen, und die molekulare Kapsel steht für neue Umsetzungen zur Verfügung. Auch die relative Orientierung der Reaktionspartner zueinander (Regio- und Stereo-Selektivität) kann erhöht werden. Darüber hinaus wird durch chiral selektives Einkapseln eine Trennung rechts- und linksdrehender Moleküle einer Verbindung möglich (Prins et al. 2001).

Die räumliche Begrenzung des Innenraumes von Nanoreaktoren kann auch für die Produktion von Nanopartikeln, Nanodrähten und Nanoröhren wohldefinierter Größe und Struktur genutzt werden. Der Nanoreaktor dient hier als Templat (Schablone, Matrize), das die nanoskaligen Abmessungen der Produktstruktur vorgibt.

Wird die Produktstruktur durch Eindiffundieren von fertigen Teilstrukturen in den Nanoreaktor und deren anschließendes Verknüpfen aufgebaut, spricht man von Flaschenschiffsynthese. Diese wird etwa bei der Synthese von Polymer-Nanopartikeln in Polyelektrolyt-Nanokapseln oder bei der Herstellung von Edelmetallcarbonyl-Clustern in Zeolithporen angewandt.

Adsorptionsmittel

Adsorptionsmittel sind Materialien (stationäre Phase), an deren Grenzfläche sich Stoffe (mobile Phase) anlagern können. Die Reversibilität dieses Prozesses wird zur Auftrennung von Substanzgemischen bzw. zur Reinigung

---

[17] Mizellen sind Aggregate aus amphiphilen Molekülen (mit hydrophilem und hydrophobem Molekülende). Das können Tenside sein, aber z. B. auch Blockcopolymere. Sie bilden sich ab einer bestimmten Konzentration in Flüssigkeiten und weisen in ihrem Inneren eine andere Polarität als die umgebende Lösung auf (z. B. unpolar gegenüber polar). Bekannt ist die Zugabe von Mizellbildnern zu Substanzen, die sonst unlöslich sind (z. B. Seife).

[18] Cyclodextrine sind aus ringförmig verknüpften Zuckermolekülen aufgebaute Abbauprodukte von Stärke (sie sind also Oligosaccharide bzw. Kohlenhydrate).

[19] Kronenether sind makrozyklische Polyether, die aufgrund ihrer Molekül-Struktur Ähnlichkeiten zu einer „Krone“ aufweisen und darüber hinaus in der Lage sind, im Zentrum des Rings z. B. Metallionen zu binden.

[20] Calixarene sind Makrocyclen aus Phenol-Bausteinen und Methylgruppen. Sie weisen vielfältige Möglichkeiten auf, Ionen und neutrale Moleküle selektiv zu binden, und sind damit als Wirtsmoleküle geeignet.

von Stoffen in der Analytik (z. B. in der Chromatographie) genutzt. Zum Erreichen einer möglichst effektiven Auftrennung ist es von Vorteil, wenn die Grenzfläche zwischen stationärer und mobiler Phase möglichst groß ist. Dies ist bei nanoporösen Materialien als stationäre Phase der Fall, weshalb zunehmend aus Siliziumdioxid-Nanopartikeln bestehende Chromatographiematerialien Anwendung finden.

Die Stärke der Wechselwirkung zwischen mobiler und stationärer Phase kann durch molekulares Prägen (Molecular Imprinting) molekülspezifisch maximiert werden. Molekular geprägte Polymere (MIPs) finden daher zunehmend Verwendung für die Flüssigchromatographie, vorwiegend für die Auftrennung von Biomolekülen und Pharmaka. Hier wird die Eigenschaft genutzt, dass die durch molekulares Prägen entstandenen Hohlräume den räumlichen Aufbau des abgeformten Moleküls widerspiegeln und Moleküle daher auch bezüglich ihrer Chiralität unterscheiden können (Ansell et al. 1996).

Ein Problem herkömmlicher Drei-Wege-Katalysatoren für die Abgasnachbehandlung von Kraftfahrzeugen ist, dass die Oxidation von Kohlenwasserstoffen erst ab einer bestimmten Betriebstemperatur des Katalysators stattfindet, die erst einige zehn Sekunden nach dem Starten des Motors erreicht wird. In dieser Zeit emittierte unverbrannte Kohlenwasserstoffe werden in die Umwelt entlassen. Hier wird an dem Katalysator vorgeschalteten Adsorbern aus nanoporösen Materialien, wie etwa Zeolithen, gearbeitet, die Kohlenwasserstoffe in der Kaltstartphase aufnehmen (adsorbieren) und bei höherer Temperatur wieder zur katalytischen Umsetzung freigeben.

2.3 Energieumwandlung und -nutzung

In diesem Bereich geht es primär um die Erhöhung der Effizienz der Energieumwandlung sowie um die verlustarme Speicherung von Energie (z. B. in Form von elektrischer Energie oder Wasserstoff). Dabei spielen materialseitige Verbesserungen eine entscheidende Rolle.

Photovoltaik

Die Effizienz der Energieumwandlung von solarer Energie in elektrische oder thermische Energie kann durch Einsatz nanotechnologischer Werkstoffe deutlich gesteigert werden. Mit antireflektierenden und lichtfokussierenden Materialien als Beschichtung von Solarzellen und Sonnenkollektoren kann die Lichtausbeute erhöht werden. Darüber hinaus stellt der Leistungsabfall von Solarzellen durch Verschmutzung ein Problem dar, das durch transparente Nanobeschichtungen mit Selbstreinigungseffekt gelöst werden könnte (z. B. Lotuseffekt).

Entwicklungsziele in der Photovoltaik sind neben der Erhöhung des Wirkungsgrades von Solarzellen auch die Verlängerung der Lebensdauer sowie die Senkung der Fertigungskosten. In der Photovoltaik wird zwischen kommerziell erhältlichen Halbleitersolarzellen (zumeist auf Basis von Silizium) und neueren Entwicklungen wie Farbstoffsolarzellen und organischen Solarzellen unterschieden. In die kommerzielle Fertigung von Halbleitersolarzellen hat die Nanotechnologie noch keinen Eingang gefunden, wobei in neueren Konzepten der Schichtaufbau und die horizontale Strukturierung bis in den Sub-µm-Bereich vorstoßen. Bei den organischen Solarzellen und Farbstoffsolarzellen dagegen, die sich aber noch in der Forschungs- bzw. Entwicklungsphase befinden, werden die notwendigen technischen Durchbrüche erst mit Nanotechnologien erreicht.

Ein Beispiel für neuere Entwicklungen zur nanotechnologisch gestützten Nutzung der Sonnenenergie, die sich derzeit noch im Stadium der Grundlagenforschung befinden, sind Quantenstrukturen wie Quantenpunkte (quantum dots) oder Quantentöpfe (quantum wells), die eine optimale Nutzung der Sonnenenergie auch im infraroten Bereich ermöglichen könnten. Beispielsweise besteht eine Quantum-Well-(Quantentopf-)Solarzelle aus verschiedenen dünnen Halbleiterschichten mit abwechselnd größerer und kleinerer Bandlücke. Hier erwartet man Vorteile bei der Temperatur- und Bestrahlungsabhängigkeit des Wirkungsgrads.

Beim Übergang von Quantendrähten zu Quantenpunkten, also zu Nanopartikeln, ändert sich neben den elektronischen Zuständen auch die thermische Relaxation angeregter Ladungsträger. Es gibt verschiedene Ideen und Konzepte, von diesen Eigenschaften für die Entwicklung von Quantum-Dot-(Quantenpunkt-)Solarzellen Gebrauch zu machen. Höhere Wirkungsgrade sollen hier entweder durch Erhöhung des Stroms durch Stoßionisation oder der Spannung durch Heißen-Elektronen-Transport erreicht werden.

Eine erfolgversprechende neue Technologie der letzten Jahre ist die Farbstoffsolarzelle. Farbstoffsolarzellen sind elektrochemische Dünnschichtsolarzellen. In nanokristallinen Elektroden aus Titandioxid ist eine Schicht aus organischen Farbstoffen (Rutheniumfarbstoff) eingebettet, um eine höhere Lichtausbeute und einen besseren Elektronentransfer vom Lichtabsorber zur Elektrode zu erreichen. Mit dieser Solarzelle wurden in Laborversuchen bei diffusem Lichteinfall Gesamtwirkungsgrade von 8 bis 10 % erreicht, die die wesentlich niedrigere Leistungsfähigkeit bei direkter Lichteinstrahlung – verglichen z. B. mit amorphen oder kristallinen Dünnschicht-Siliziumzellen – wettmachen könnten. In Zukunft werden Wirkungsgrade von 12 % erwartet. Ein wichtiges Entwicklungsziel ist die Erhöhung der Lebensdauer von derzeit ca. drei bis vier Jahren auf zehn bis 20 Jahre, wie sie für Fassadenanwendungen gefordert wird. Der hauptsächliche Vorteil der Farbstoffsolarzellentechnologie liegt in der Verwendung von prinzipiell kostengünstigen Herstellungstechnologien, welche den in der Glas- und Elektronikindustrie verwendeten Herstellungstechnologien ähneln. Weltweit wird derzeit daran gearbeitet, verbesserte Solarzellen für leistungsarme Anwendungen wie Mobiltelefone oder Laptop-Computer zur Marktreife zu bringen.

Eine weitere neue Gruppe stellen organische Solarzellen dar, bei denen die photoaktiven Schichten aus organischen Materialien bestehen. Organische Materialien absorbieren Licht besser als anorganische Solarzellenmaterialien und benötigen deshalb deutlich geringere

Schichtdicken. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt zeigen polymere Solarzellen – die auf Basis von Kompositen aus p-leitenden Polymeren (Donator) und C_{60}-Fullerenderivaten (Akzeptor) bestehen – die höchste Effizienz (3 %). Polymere Solarzellen stellen damit zurzeit keinen Hocheffizienzansatz dar. Allerdings ist ihr Potenzial noch nicht ausreichend evaluiert, sodass langfristig auch hohe Wirkungsgrade möglich sein könnten.

Mithilfe von Oberflächenbeschichtungen lassen sich Entspiegelungseffekte erreichen (z. B. Entspieglung des vorderseitigen Abdeckglases bei Siliziumsolarzellen durch nanoporöse Schichten). Auch der Wärmeertrag von solarthermischen Anlagen kann durch Antireflexglas gesteigert werden (z. B. Reflexionsschicht aus nanoporösem SiO_2, die über das gesamte solare Spektrum wirksam ist). Dadurch lässt sich die Lichttransmission bei Sonnenkollektoren zur Wassererwärmung um rund 6 % verbessern, bei Photovoltaik-Systemen immerhin noch um 3 bis 3,5 %.

Die Thermophotovoltaik stellt eine Variante der Photovoltaik dar, in der thermische Strahlung einer bestimmten Wellenlänge mithilfe von Solarzellen direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Eine wichtige Komponente dieser Systeme – der selektive Emitter, der die Wärmestrahlung möglichst angepasst auf die spektrale Empfindlichkeit der Solarzelle emittieren soll – kann die gewünschte Selektivität z. B. durch Mikrostrukturierung von metallischen Oberflächen bekommen. Damit wird die Selektivität dieses System mit Strukturen erreicht, welche im Nanometer- bis Mikrometerbereich liegen. Probleme liegen zurzeit noch in der Langzeitstabilität dieser Oberflächen bei hoher Temperaturbelastung. Die theoretischen Wirkungsgrade dieser Systeme liegen im Bereich von 20 %. Erste heute auf dem Markt befindliche Prototypen besitzen Wirkungsgrade im Bereich um < 5 %.

Brennstoffzellen

Brennstoffzellen wandeln die bei einer chemischen Reaktion (z. B. Umsetzung von Wasserstoff oder Kohlenwasserstoffen) frei werdende Energie direkt in elektrische Energie um. Von der Brennstoffzellentechnologie werden daher deutlich höhere Wirkungsgrade als bei konventionellen Energieumwandlungsanlagen erwartet. Zudem spricht auch die Umweltfreundlichkeit dieser Technologie für ein zukünftig breites Anwendungspotenzial. Es gibt verschiedene Brennstoffzellentypen, die sich in Aufbau, Wirkungsgrad und Betriebstemperatur unterscheiden.

Nanotechnologie wird in der Brennstoffzellentechnologie bisher vor allem im Bereich der Katalysatoren und Membranen eingesetzt. Dabei geht es um Maßnahmen zur Vergrößerung reaktiver Oberflächen bis hin zur weiteren Minimierung benötigter Schichtdicken bei Elektroden oder Membranen, so etwa bei der mit niedrigen Betriebstemperaturen arbeitenden (Polymerelektrolyt-)Membran-Brennstoffzelle (PEM), bei der Nanopartikel als Katalysatoren zum einen für die vorgelagerte Erzeugung von Wasserstoff (z. B. aus Methanol) und zum anderen für die eigentliche Umsetzungsreaktion an der Membran eingesetzt werden. Durch die Verwendung von Nanopartikeln (z. B. Platin-Nanopartikel auf einer Kohlenstoffunterlage) wird die katalytisch aktive Oberfläche stark erhöht und die Menge des benötigten Edelmetalls reduziert. Dadurch ließen sich die Kosten für die Edelmetallkatalysatoren drastisch senken. Zudem lassen sich auch die Elektrolytmembranen in PEM-Brennstoffzellen durch Nanopartikel mit optimierter Protonenleitfähigkeit verbessern.

Beim Einsatz kohlenstoffhaltiger Brennstoffe entstehen Nebenprodukte, die als Katalysatorgift wirken. Benötigt werden daher kohlenmonoxid-tolerante Katalysatoren und Elektroden. Dazu werden Platin-Ruthenium-Legierungen und andere binäre und ternäre Legierungen als Katalysatoren getestet. Ein weiterer Ansatz zur Vermeidung der Katalysatorvergiftung durch CO ist der Betrieb der Brennstoffzelle bei höheren Temperaturen (150 bis 200 °C), bei denen das CO von der Katalysatoroberfläche desorbiert. Dazu ist aber ein Ersatz des bei diesen Temperaturen gasförmigen Wassers, das für die Protonenleitung in der Membran verantwortlich ist, notwendig. Hier experimentiert man mit wasserfreien Membranen, in denen auf Nanopartikeln fixierte Imidazolderivate für Protonenleitung sorgen.

Auch bei der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle treten Probleme bei den verwendeten Membranen auf, da Methanol und Wasser durch derzeit verwendete Membranmaterialien durchtreten. Dadurch kommt es zu Brennstoffverlusten und schlechten Wirkungsgraden. Benötigt werden daher neue selektivere Membranen, außerdem wird für die Membranen eine höhere Temperaturstabilität gefordert.

Im Hochtemperaturbereich werden beispielsweise für die Festoxid-Brennstoffzelle (solid oxide fuel cell, SOFC) keramische Nanopulver (z. B. Yttrium-stabilisiertes Zirkonium) zur Herstellung von Feststoff-Elektrolyten eingesetzt, die eine verbesserte Ionenleitfähigkeit aufweisen.

Wasserstoffspeicherung

Um den Wasserstoff für die Energiegewinnung durch Verbrennung oder für den Betrieb einer Brennstoffzelle über längere Zeit kontinuierlich zur Verfügung zu stellen, wird ein chemischer Speicher benötigt, bei dem Wasserstoff reversibel in eine Struktur eingelagert wird, oder ein physikalischer Speicher, der Wasserstoff in flüssiger Form oder unter hohem Druck aufnehmen kann.

Verfügbare Speichermöglichkeiten für Wasserstoff weisen unterschiedliche Speicherdichten und technische Besonderheiten auf. Druckwasserstoffspeicher – als die verbreiteste Form der Speicherung – erreichen für viele Anwendungen nicht die erforderliche Speicherdichte und können ein Sicherheitsproblem darstellen. Flüssigwasserstoffspeicherung in Kryotanks – massenbezogen die beste Speichermethode – ist gerade für Kleingeräte nicht akzeptabel; generell kommt es zu Verlusten durch das Abdampfen aus dem Kryotank. Bei der chemischen Speicherung von Wasserstoff in Form von Kohlenwasserstoffverbindungen (z. B. Methanol) ist die Speicherdichte sehr hoch, aber es entstehen bei der Umsetzung klimarele-

vante Emissionen, und der Wirkungsgrad liegt niedriger als bei der Verwendung reinen Wasserstoffs. Denkbar sind neben Kohlenwasserstoffen und Methanol auch Wasserstoffverbindungen leichter Elemente wie Lithium, Bor, Natrium oder Aluminium.

Eine weitere Klasse chemischer Wasserstoffspeicher sind die Metallhydrid-Speicher, die bereits eingeführt sind. Hochtemperaturspeicher, die im Temperaturbereich bis etwa 300 °C den Wasserstoff wieder abgeben können, sind nanokristalline Leichtmetallhydrid-Partikel aus Magnesium-Nickel-Legierungen. Niedertemperaturspeicher, die für mobile elektronische Geräte geeignet sind, bei denen keine hohe Speicherkapazität erforderlich ist, bestehen aus Lanthan-Nickel-($LaNi_5$-)Legierungen und können schon bei ca. 80 °C angewendet werden. In ihnen ist die Wasserstoffdichte größer als in flüssigem Wasserstoff, der Massenanteil des Wasserstoffs liegt etwas unter zwei Massenprozent. Ein höherer Massenanteil soll durch die Verwendung leichterer Elemente wie Kalzium und Magnesium und verschiedene Methoden der Mikro- und Nanostrukturierung erreicht werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Speicherung von Wasserstoff in Nanoröhren aus Kohlenstoff und anderen Fullerenderivaten. Deren Speicherdichte verhält sich proportional zur spezifischen Oberfläche. Reproduzierbar wurde bisher eine Wasserstoffaufnahme von bis zu etwa zwei Massenprozent erreicht. Deutlich höhere publizierte Werte scheinen auf fehlerbehafteten Experimenten zu beruhen. Entscheidende Verbesserungen werden von einer strengeren Ausrichtung der in bisherigen Anordnungen wirr durcheinanderliegenden Faserbündel in einer möglichst dichten Packung erwartet.

Batterien/Akkumulatoren und Superkondensatoren

Der Trend zur Miniaturisierung bei mobilen Kommunikationsanwendungen stellt an die Stromversorgung immer höhere Anforderungen. Wichtig für höhere Stromleistungen von miniaturisierten Batterien und Akkus sind kurze bzw. definiert einstellbare Diffusionswege für die Ladungsträger, um die erforderliche Strommenge schnell zur Verfügung stellen zu können.

Zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Batterien können elektronische Eigenschaften von Nanomaterialien genutzt werden. Als graphitische, nanoporöse Elektrodenmaterialien eignen sich Carbon-Aerogele mit ihrer extrem großen inneren Oberfläche sowie der kontrollierbaren Porenverteilung und Porendurchmesser. Dadurch lässt sich die elektrische Leitfähigkeit und damit die elektrische Leistung erhöhen. Umgekehrt lässt sich die Ladegeschwindigkeit bei wiederaufladbaren Batterien erhöhen. Batterieseparatoren aus flexiblen keramischen Membranfolien könnten in Hochleistungsbatterien zum Einsatz kommen.

Dominierend im Bereich portabler Batterien sind derzeit Lithium-Ionen-Akkus. Die Elektrodenkapazität der positiven Elektrode kann durch maßgeschneiderte nanoporöse Kompositelektroden mit hoher Oberfläche, z. B. Aerogele, gesteigert werden. Auch die Verwendung von Nanoröhren könnte zur Erhöhung der Kapazität führen. Die Leitfähigkeit von Polymerelektrolyten lässt sich durch den Zusatz von nanopartikulären Füllstoffen wie Aluminium- oder Titanoxid steigern. Mit speziellen Lithiumtitanatpartikeln beschichtete Batterieelektroden sollen die Ladezeit von Lithium-Ionen-Akkus um den Faktor 10 bis 100 verkürzen (ohne Verschlechterung der Elektrodeneigenschaften mit der Anzahl der Ladezyklen). Beispielsweise wurde durch Verwendung von gleichmäßig verteilten Nanopartikeln aus Kobalt-, Nickel- und Eisenoxid in den Elektroden statt der üblichen Graphit-Elektroden in Lithiumionenakkus eine etwa sechsfache, reversible Ladungskapazität erreicht. Diese Entwicklung könnte den Weg zu noch leistungsfähigeren Mini-Akkus ebnen.

Die Fortschritte bei nanoporösen Elektrodenmaterialien finden auch bei elektrochemischen Kondensatoren (Superkondensatoren) Anwendung. Superkondensatoren – als Zwischenspeicher für Energie – stellen eine gute Ergänzung zu Batterien dar, die sich am besten zur gleichmäßigen Stromabgabe eignen. Auch kurzfristig erhöhte Leistungsabgaben (Lastspitzen) können durch einen Superkondensator ausgeglichen werden. Benötigt wird dies z. B. beim Senden von Daten per Mobiltelefon. Zudem ist die Kombination von Superkondensatoren mit Batterien auch für Antriebszwecke vielversprechend. So lässt sich die Leistung eines Elektromobils kurzfristig, z. B. zum Beschleunigen, stark erhöhen, und die beim Bremsen erzeugte elektrische Energie lässt sich kurzfristig speichern. Bislang wird als Elektrodenmaterial bei Superkondensatoren Industrieruß verwendet, der durch oxidative Behandlung aktiviert wird. Möglich ist jetzt auch die Verwendung von Carbon-Aerogelen. Damit erreicht man einen besonders guten Kontakt zum Elektrolyten, und es lassen sich sowohl Energie- als auch Leistungsdichte erhöhen. Andere verwendete Materialien sind Keramiken, die aus Nanopulvern von Nitriden und Karbiden der Übergangsmetalle gesintert werden.

Stromtransport und -speicherung

Die hohen Verluste beim Stromtransport machen die Verwendung von supraleitenden Leitungen interessant. Die Anforderungen an Stromdichte und Übergangstemperatur werden derzeit nur von ausgewählten Hochtemperatursupraleitern erfüllt. Der Hochtemperatursupraleiter Bi-2223 wird bereits für Stromleitungen verwendet. Eine breite Anwendung dieser Materialien hängt von ihrer kostengünstigen Herstellung ab. Dabei setzt man Hoffnung auf Nanoröhren, bei denen Supraleitfähigkeit bei Raumtemperatur für möglich gehalten wird, was allerdings nicht unumstritten ist.

Supraleitende Materialien können auch zur Speicherung von Energie verwendet werden. In supraleitenden magnetischen Energiespeichern (SMES = Superconducting Magnetic Energy Storage) wird elektrische Energie in einer supraleitenden Spule als Kreisstrom gespeichert. Da es keine Widerstandsverluste gibt, rotiert der Strom endlos. Das Laden und Entladen eines solchen Speichers ist mit nur sehr geringen Verlusten möglich. Erste Anwendungen wird es beim Ausgleichen von Lastspitzen und beim

Steuern von Frequenz und Spannung geben. Generell gilt für Hochtemperatursupraleiter, dass mit zunehmender Sprungtemperatur die Empfindlichkeit der Leitungseigenschaften gegenüber nanoskaligen Defekten in der Kristallstruktur zunimmt. Daher wird an kosteneffektiven kontinuierlichen Produktionsprozessen für das supraleitende Material und an Beschichtungen gearbeitet, die das Leitungspotenzial der Supraleiter auszuschöpfen helfen sollen.

Festtreibstoffe

Nanopartikel sind als Komponente von Festtreibstoffen für die Optimierung des Abbrandverhaltens von Interesse. Genereller Vorteil nanoskaliger Partikel bzw. Strukturen ist, dass die Komponenten eines energetischen Materials quasi auf molekularer Größenskala gemischt werden können. Durch diese bestmögliche Durchmischung sind die Voraussetzungen für eine schnelle chemische Umsetzung gegeben. So wurde festgestellt, dass Aluminiumnanopartikel im Vergleich zu herkömmlichen Aluminiumpulvern die Abbrandrate erhöhen können.

2.4 Konstruktion

Eine entscheidende Rolle im Konstruktionsbereich spielen Materialgrößen wie Zugfestigkeit, Härte, Verschleißfestigkeit, Duktilität oder auch Permeabilität, die durch Einführung charakteristischer Strukturgrößen im Nanometerbereich gezielt verbessert werden sollen. Daneben geht es aber auch um die Realisierung völlig neuartiger Materialverbunde. Viele Strukturanwendungen nanokristalliner Werkstoffe ergeben sich aus verbesserten mechanischen Eigenschaften durch Verteilung von Nanopartikeln in einer keramischen, metallischen oder Polymer-Matrix.

Nanostrukturierte Keramiken

Bei konstruktionstechnisch anwendbarer Funktionskeramik, z. B. polykristallinen Piezoelektrika in der Schwingungsdämpfung oder anderer Aktorik, wird untersucht, ob die Einstellung von Korngrößen im Nanometerbereich die Lebensdauer dieser Keramiken positiv beeinflussen kann.

Bei Strukturkeramik liegt das Hauptaugenmerk auf der Verbesserung ihrer mechanischen Eigenschaften bei niedrigen und hohen Temperaturen sowie der Temperaturwechselbeständigkeit. Diese Eigenschaften lassen sich durch die Einstellung bestimmter Gefügetypen verbessern. Dabei zeigen häufig so genannte Mikro-/Nanogefüge, bei denen Nanokristallite fein verteilt in einer mikrokristallinen Matrix vorliegen, bessere thermomechanische Eigenschaften als konventionelle Keramiken vergleichbarer chemischer Zusammensetzung.

Eine Vielzahl rein nanoskaliger keramischer Gefüge, deren Korndurchmesser im unteren zweistelligen Nanometerbereich liegt, zeigt bei Temperaturen deutlich unterhalb des Schmelz- bzw. Zersetzungspunktes superplastisches Verhalten. Diese Superplastizität kann genutzt werden, um die Keramik über so genanntes Heißschmieden in die gewünschte Form zu bringen. In der Regel muss eine weitere Temperaturbehandlung folgen, um das Werkstück durch kontrolliertes Kornwachstum auf das gewünschte Eigenschaftsprofil einzustellen.

Kunststoffe mit Nanofüllstoffen

Mit Nanopartikeln verstärkte bzw. mit Nanofüllstoffen versehene Polymere können wie konventionelle Polymere geformt und extrudiert werden, besitzen jedoch Merkmale, die zwischen denen von organischen Polymeren und anorganischen Keramiken liegen. Praktisch alle physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Polymers können mit Füllstoffen modifiziert werden. Beispielsweise genügt bereits ein Füllgrad von 5 % an Nanostoffen, um die mechanischen Eigenschaften des Verbundes um bis zu 80 % zu verbessern (INT 2003). Weitere Vorteile dieser Werkstoffverbunde liegen in einer gesteigerten Hitzebeständigkeit, in praktisch ebenso geringen Dichten wie bei den Matrixpolymeren und in unveränderten optischen Eigenschaften. Nachteilig ist in der Praxis, dass sich Nanoprimärteilchen oft (unerwünscht) zu einigen Mikrometer großen, nahezu untrennbaren Sekundärpartikeln zusammenlagern. Hier wird an Herstellungs- und Charakterisierungsverfahren zur Realisierung nicht agglomerierender Nanofüllstoffe für Polymere gearbeitet.

Einsatzmöglichkeiten derart optimierter Materialien finden sich in besonders beanspruchten Bereichen des Leichtbaus oder in Hochtemperaturanwendungen, aber auch in Massenanwendungen wie Kunststoffgehäusen oder -verkleidungen (wo bisher konventionelle Kunststoffe eingesetzt wurden). Beispiele sind mit Tonpartikeln verstärkte Polymere, die bereits als Verpackungsmaterial für Lebensmittel eingesetzt werden, oder Mehrschicht-Kunststofftanks, in denen die positiven Barriereeigenschaften ausgenutzt werden (Hohenberger 2000; König 2002; VDI 2002).

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz in Kunststoffen ist die Nutzung von nanostrukturierten Rußpartikeln als Füllstoffe in Autoreifen, die mit größeren Partikeln heute bereits Stand der Technik ist (Kapitel V.1).

Metallverbindungen

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Metallen soll in Zukunft durch das direkte Einbringen von nanoskaligen Teilchen aus anderen Materialien wie Siliziumcarbid, Siliziumdioxid, Titandioxid, Bornitrid oder Diamant z. B. in die Metallschmelze erreichbar sein. Beispielsweise verbessert das Versetzen von Aluminium mit oxidischen Nanopartikeln die Zugfestigkeit gegenüber konventionellen Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierungen um 100 %. Durch das Einbringen von Phasen im Nanometerbereich lassen sich z. B. auch Stähle mit besonders hohen Festigkeiten bei gleichzeitig sehr guter Verformbarkeit herstellen. Damit sind an gleicher Stelle dünnere Metallteile einsetzbar, wodurch ein wesentlicher Beitrag zum Leichtbau geleistet werden kann (König 2002).

Darüber hinaus wurde durch Nanostrukturierung des Gefüges auch eine Duktilisierung intermetallischer Verbindungen z. B. im System Titan/Aluminium erzielt, die sowohl im Leichtbau als auch für Hochtemperaturanwendungen von Interesse sind. Insgesamt ergeben sich damit Verbesserungen sowohl im Hinblick auf die Prozesstechnologien zur Herstellung als auch hinsichtlich der einsatzrelevanten Eigenschaften (Kretschmer/Kohlhoff 1995).

Von den technisch interessanten Eigenschaften, die metallische Gläser den ihnen entsprechenden polykristallinen Werkstoffen oft überlegen machen, werden insbesondere das magnetische und das mechanische Verhalten in kommerziellen Anwendungen genutzt. Beide Eigenschaften können durch parzielle Nanokristallisation verbessert werden. Beispielsweise ist es durch die Entdeckung der so genannten Bulk Metallic Glasses (massive metallische Gläser) möglich geworden, auch Volumenkörper über Formgießverfahren herzustellen. In Kombination mit ihrer mechanischen Flexibilität werden weichmagnetische metallische Gläser zunehmend zur Abschirmung elektrischer Geräte eingesetzt.

Bindebaustoffe

Wesentliche Eigenschaftsverbesserungen sind auch im Bereich der Baustoffe – insbesondere durch Betonzusatzstoffe – möglich. Vereinfacht kann man Beton als einen Teilchenverbund auffassen, in dem nach der Zementierungsreaktion in eine keramische Matrix diverse Teilchen/Partikel fest eingebunden sind.

Durch Beimischen verschiedenster Zusatzstoffe können die Eigenschaften des Betons sowohl im Hinblick auf die Fertigungsprozesse als auch auf den Einsatz selbst beeinflusst werden. Zu den neuen Angeboten auf diesem Gebiet gehört so genannte Nanosilica. Dabei handelt es sich um äußerst reaktives synthetisches Siliziumdioxid, dessen mittlere Teilchengröße im Bereich von 15 nm liegt. Diese Partikel lagern sich in den Zwischenräumen der Zementkörner ein und erhöhen so die Packungsdichte der Zementsteinmatrix. Zudem reagieren die amorphen silicatischen Bestandteile mit Kalkbestandteilen des Zementes und bilden festigkeitssteigerndes Calciumsilicathydrat. Die dritte Wirkung basiert auf der Verbesserung der Kontaktzone zwischen den Zuschlagstoffen und dem Zementstein. Im Ergebnis wird der Baustoff außerordentlich dicht. Insgesamt erzielen auf diese Weise modifizierte Hochleistungsbetone deutlich höhere Druckfestigkeiten bei verbessertem Verschleiß-, Erosions- und Frostwiderstand. Außerdem sinken Wassereindringtiefe und Permeabilität (Askeland 1996).

2.5 Nanosensoren und Aktuatoren

Im Bereich der Sensorik geht es – zumeist durch Verwendung nanoskaliger Sensoroberflächen – um eine deutliche Verbesserung der Empfindlichkeit und Präzision (zumeist oberflächen-)analytischer Verfahren. Nanosensoren sind für alle Vorgänge und Objekte interessant, die selbst nur kleine Leistungen abgeben oder bei denen nur kleine Leistungen für die Signalgewinnung abgezweigt werden dürfen (Köhler 2001).

Zudem wird eine Vielzahl von Sensoren zur Detektion physikalisch-chemischer Größen und deren Umwandlung in zumeist elektrische Signale durch die Nanotechnologie erst ermöglicht. Im Folgenden werden nur Beispiele aufgeführt, bei denen durch Nanoskaligkeit neu zugängliche Funktionalitäten genutzt werden. Sensortypen, die bereits im Mikromaßstab funktionieren und durch weitere Fortschritte in der Lithographie und anderen Nanostrukturierungstechniken graduell weiter miniaturisiert werden können, werden nicht aufgeführt. Außerdem werden einige nanotechnologiebasierte Aktuatoren vorgestellt.

Sensoren

Für die Vermessung von Mikro- und Nanostrukturen werden Messverfahren mit Nanometergenauigkeit benötigt. Dabei kommen unterschiedliche Messverfahren zum Tragen. Die elektrischen und magnetischen Messverfahren setzen einen unmittelbaren mechanischen Kontakt oder zumindest einen geringen Abstand zwischen dem zu vermessenden Objekt und den Nanosensor voraus. Im Gegensatz dazu können optische Verfahren meist mit einem größeren Abstand innerhalb des Messsystems arbeiten.

Magnetfeldsensoren

Nanotechnologiebasierte Sensoren zur Detektion mechanischer Größen (wie Position, Abstand) beruhen meist auf Magnetfeldsensoren: auf einem bewegten Teil sitzt ein „Gebermagnet“, dessen Magnetfeldänderung mit dem Magnetfeldsensor vermessen wird. Als Magnetfeldsensoren finden zunehmend Riesenmagnetwiderstandseffekt-(GMR)-Sensoren Anwendung (z. B. in Airbag-Systemen), da deren Empfindlichkeit einen größeren Abstand zum Gebermagneten als bei konventionellen Sensoren erlaubt, wodurch sich der Systemaufbau vereinfacht. Sie sind sehr robust und finden Einsatz in der Automatisierungs- und Sicherheitstechnik sowie im Automobil- und Maschinenbau (Mengel 1997; Wecker et al. 2002).

Die Hauptanwendung von GMR-Magnetfeldsensoren sind derzeit Leseköpfe von Festplattenspeichern. Solche Leseköpfe schweben in einem Abstand von nur wenigen Nanometern über der rotierenden Festplatte und detektieren die Streufelder der magnetischen Bits. Ihre höhere Empfindlichkeit und geringere Größe erlauben das Auslesen von sehr viel kleineren und dichter zusammen liegenden Bitmustern als mit den konventionellen Magnet-Köpfen. Allerdings sind aufwendigere Fehlerkorrekturcodes nötig.

Höhere Speicherdichten erhofft man sich von der Nutzung des so genannten außergewöhnlichen Magnetwiderstandseffektes (EMR), der in speziellen Nanostrukturen von Verbindungshalbleitern auftritt. EMR-Sensoren sind wesentlich einfacher herstellbar als GMR-Sensoren. Eine noch höhere Empfindlichkeit bei erheblich kleineren Sensorstrukturen könnte der Ballistische Magnetwiderstandseffekt (BMR) ermöglichen.

Magnetfeldsensoren werden außer im Bereich der Datenspeicherung auch für medizinische Diagnostik (z. B. Magnetoenzephalographie, Magnetokardiographie), für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (z. B. Flugzeugwartung) und für geologische Detektionsverfahren benötigt.

Optische Sensoren

Mit Infrarotsensoren lässt sich eine hohe thermische und räumliche Auflösung realisieren. Den höchsten Entwicklungsstand haben zurzeit hochintegrierte Infrarot-Detektormosaike (Focal-Plane Arrays) aus Quantentrog-Infrarot-Photodetektoren (QWIPs, Quantum-Well Infrared Photodetectors). Deren spektrale Empfindlichkeit lässt sich durch Materialdotierung und Veränderung der Schichtdicke der Halbleiter maßschneidern. QWIPs müssen gekühlt werden (u. a. zur Minimierung des so genannten Dunkelstroms).

Daneben ist das Konzept des Quantenpunkt-Infrarot-Photodetektors (QDIP, Quantum-Dot Infrared Photodetector) vielversprechend, mit dem u. a. auch höhere Arbeitstemperaturen realistisch erscheinen. Dabei sind noch technische Schwierigkeiten zu überwinden (z. B. Erreichen einer ausreichenden Quanteneffizienz, Realisierung von Quantenpunkten mit extrem gleichmäßiger Größe und Materialzusammensetzung) (FhG-IAF 2002).

Die Photoaktivität des biologischen Farbstoffs Bakteriorhodopsin lässt sich für sensorische Anwendungen nutzen. Er wandelt Licht in chemische Energie um, was durch Farbwechsel erkennbar ist. Einsetzbar ist er als Sicherheitspigment (z. B. Kopierschutz) oder zur Entwicklung einer künstlichen Retina (eines in Pixel unterteilten photoelektrischen Detektors) (Basler & Hofmann 2002).

Temperatursensoren

Im Arznei- und Lebensmittelbereich ist es wichtig zu wissen, ob verpackte Lebensmittel oder z. B. Blutproben im Verlaufe von Lagerung oder Transport eine bestimmte Temperatur über- oder unterschritten haben. Hierfür werden kommerziell Markierungen („Thermolabels“) auf Nanotechnologiebasis angeboten, die durch Verfärbung, z. B. durch Verschwinden eines Barcodes, Temperaturüber- oder -unterschreitung anzeigen. Die Schwelltemperatur ist dabei individuell einstellbar.

Darüber hinaus soll kürzlich die Herstellung eines nanoskaligen Analogons zum Quecksilberthermometer gelungen sein (Gao/Bando 2002). Dabei wird in mit flüssigem Gallium gefüllten Kohlenstoffnanoröhren die Länge der Galliumsäulen mittels Elektronenmikroskop ausgelesen, welche im Bereich 50 bis 500 °C linear mit der Temperatur korrelieren soll.

Mit dem Rasterwärmemikroskop kann die thermische Leitfähigkeit bzw. Temperaturverteilung einer Probenoberfläche mit typischen Ortsauflösungen im unteren Mikrometerbereich gemessen werden. Wichtigstes Einsatzgebiet ist die hochauflösende Kartierung der Wärmeableitung auf elektronischen Bausteinen, insbesondere Prozessorchips.

Chemosensoren

Chemosensoren nutzen eine chemische Reaktion bzw. einen physikalisch-chemischen Effekt zur Identifizierung und häufig auch zur Konzentrationsbestimmung von Stoffen. So nutzen Metalloxid-Gassensoren die Veränderung der Leitfähigkeit eines Metalloxidfilms durch die Adsorption eines Gases. Durch Verwendung eines nanokristallinen Metalloxidfilms lassen sich Empfindlichkeit, Ansprechgeschwindigkeit und Selektivität der Sensoren häufig erheblich erhöhen. Viele Oxide kommen überhaupt erst in nanokristalliner Form für eine Verwendung als Sensormaterial infrage.

Kleinste Stoffmengen können durch die selektive Adsorption von Molekülen an die chemisch funktionalisierte Oberfläche dünner Nanobiegebalken detektiert werden. Die Auslenkung der Nanobiegebalken ändert sich aufgrund von Quellung oder Schrumpfung von dünnen Oberflächenschichten beim Ablaufen chemischer Reaktionen. Nanobiegebalken sind aus zwei unterschiedlichen Schichten aufgebaut oder weisen zumindest unterschiedliche Oberflächen auf. Die Adsorption eines Stoffes führt zu einer Änderung des mechanischen Spannungszustandes des Biegebalkens, was sich in einer leichten Verbiegung – die durch einen Laserlichtzeiger ausgelesen werden kann (wie bei Rasterkraftmikroskopen) – oder einer Änderung des Schwingungsverhaltens (Resonanzfrequenz) bemerkbar macht.

Halbleitende Einzelwand-Kohlenstoffnanoröhren können auch als konduktometrische Gassensoren verwendet werden. So erhöht sich die Leitfähigkeit einer solchen Nanoröhre bei Stickstoffdioxid-Adsorption, verringert sich jedoch bei Adsorption von Ammoniak.

Palladiumdraht findet Anwendung als konduktometrischer Wasserstoffsensor. Mit Nanodrähten aus Palladium lassen sich erheblich verbesserte Empfindlichkeit, Ansprechgeschwindigkeit und Selektivität für Wasserstoff sowie ein geringerer Energieverbrauch erreichen.

In einer Polymer-Hydrogel-Matrix eingeschlossene monodisperse kolloidale Polystyrolkügelchen ordnen sich zu Strukturen an, deren Gitterkonstante im sichtbaren Wellenlängenbereich des Lichtes liegt. Solche Materialien zeigen irisierende Farberscheinungen. Sie lassen sich als Sensor durch Anlagerung von bestimmten Ionen nutzen, durch die sich die Gitterkonstante verändert und damit eine sichtbare Farbverschiebung auftritt. Als eine mögliche Anwendung wäre z. B. ein Glukosesensor denkbar, der subkutan implantiert wird, sodass ständig anhand der Farbe der Blutzukkergehalt ablesbar wäre (Asher 2001).

Durch molekulares Prägen gelingt die Herstellung synthetischer Strukturen, die (durch molekulare Erkennung) eine Selektivität aufweisen, die nahe an die von Enzymen heranreicht. Molekular geprägte Polymere (MIPs) sind sehr selektive biomimetische Rezeptoren. Die Ankopplung an elektrisch oder optisch auslesbare Strukturen bereitet aber noch Probleme. Die Entwicklung praktikabler Chemosensoren auf Basis molekular geprägter Polymere befindet sich noch in einem frühen Stadium (Ansell et al. 1996; Vidyasankar/Arnold 1995).

Biosensoren

Biosensoren sind Chemosensoren, die mit Biomolekülen oder ganzen Zellen funktionalisiert sind, sodass mittels molekularer Erkennung eine selektive Anbindung bestimmter Biomoleküle, Viren oder Zellen stattfinden kann.

Ein Beispiel hierfür sind so genannte Lab-on-a-Chip-Systeme (Kapitel IV.2.7 u. VII.2.3), die zur simultanen Analyse einer großen Anzahl von Biomolekülen, zum Nachweis und zur Identifikation von Mikroorganismen sowie allgemein zur Genom-, Proteom- oder Metabolomuntersuchung eingesetzt werden können. Erwartete Vorteile dieser neuartigen Analysesysteme – die keine bloße Verkleinerung bekannter Laborgeräte darstellen, sondern auf völlig neuen Ansätzen aufbauen – liegen in der potenziell erheblich verbesserten Leistungsfähigkeit und Durchsatzgeschwindigkeit sowie einer Reduktion der Kosten und des Verbrauchs an Reagenzien und Analyten. Zudem wäre damit die Herstellung haushaltstauglicher Analysechips möglich. Der Begriff Lab-on-a-Chip umfasst Mikrofluidiksysteme zum Transport und zur Manipulation von Flüssigkeiten und u. U. darin enthaltenen Partikeln (z. B. Zellen) in Mikrokanälen, wobei mannigfaltige Möglichkeiten zur Integration chemischer und biochemischer Prozesse existieren. Die Nanotechnologie besitzt bei Lab-on-a-Chip-Systemen hinsichtlich der Funktionalisierung von Grenzflächen (Schnittstellen zwischen biologischen und technischen Bauelementen) und in Form von Nanopartikeln als molekularen Markern eine große Bedeutung. Lab-on-a-Chip-Systeme befinden sich momentan noch in der Entwicklung. Ein großes Problem stellt derzeit noch das Auftreten von Fäulnisprozessen dar.

Zur weiteren Entwicklung von Geräten, die nach einem molekular-biologischen Erkennungsprinzip arbeiten, sind Nanopartikel aus Metall und Halbleitermaterial (Durchmesser etwa 2 bis 6 nm) wegen ihrer ähnlichen Größendimension zu biologischen Makromolekülen von Interesse. Halbleiternanokristalle, so genannte Quantenpunkte, stellen eine neue Klasse von wasserlöslichen und biokompatiblen Fluoreszenzmarkern dar, mit Vorteilen gegenüber bislang verwendeten Markersubstanzen. Die Quantenpunkte besitzen u. a. enge symmetrische Emissionsspektren, wodurch Mehrfarbenmarkierungen möglich sind. Zum Beispiel wäre mit Cadmiumselenid-Quantenpunkten, die in mikro- bis nanoskalige Polystyrolkügelchen (so genannte Beads) eingebettet sind, bei einer Kombination aus sechs Farben und zehn Intensitäten theoretisch die Codierung von 1 Million verschiedener DNA-Signaturen oder Antikörpern möglich. In Verbindung mit heute verfügbaren leistungsstarken Durchflusszytometern könnte die Quantenpunkt-Bead-Technologie einen aussichtsreichen Ansatz für eine Reihe bioanalytischer Anwendungen darstellen.

Eine große Bedeutung besitzt die Nanotechnologie auch bei der Funktionalisierung von Oberflächen für Biomikrosystem- und Biosensorikentwicklungen. Oberflächenbeschichtungen zur Immobilisierung von biogenen Makromolekülen und ganzen Zellen sowie Fäulnisschutzfilme stellen wesentliche Anwendungsgebiete dar. Verschiedene organische Filme wie selbstorganisierende Monoschichten (SAMs) oder oberflächenaktive Doppelschichtmembranen gelten als aussichtsreicher biomimetischer Ansatz zur funktionalen Kopplung der technischen und der biologischen Komponente von Biosensoren. Um z. B. Fäulnisprozesse bei verschiedenen Lab-on-a-Chip-Anwendungen zu verhindern, werden erfolgreich Beschichtungen (10 nm) aus Polyethylenglykol verwendet.

Aktuatoren

Die Natur hat diverse Systeme hervor gebracht, die im Nanometerbereich Bewegungen ausführen. Solchen molekularen Motorsystemen liegen Komplexe aus Eiweißmolekülen zugrunde, deren Energiezufuhr und Steuerung auf chemischem Wege erfolgt. Die treibende Kraft der molekularen Maschinen stellen zumeist Konzentrationsgradienten dar. Chemomechanische Nanomaschinen gehören zu den zentralen Funktionsbestandteilen der Zelle. Sie sind für den innerzellulären Transport verantwortlich und werden auch zur Erzeugung makroskopischer Muskelbewegungen genutzt.

Natürliche Motoren für Linearbewegungen stellen die Motorproteine Myosin, Dynein und Kinesin dar, die durch zwischenmolekulare Kräfte an Aktinfilamenten bzw. Mikrotubuli haften und für die Muskelkontraktion bzw. intrazellulären Transport verantwortlich sind. Dabei bewegen sich Teile der Proteinkomplexe gegeneinander, wobei chemische Energie in mechanische Arbeit umgesetzt wird. Diese Proteine lassen sich zukünftig in chemischen oder gentechnischen Abwandlungen oder als biomimetischer Nachbau möglicherweise für die Konstruktion komplexerer Nanomaschinen nutzen.

Neben translatorisch arbeitenden Proteinsystemen besitzt die lebende Zelle auch rotatorisch arbeitende Systeme (z. B. Geißeln von Zellen). Zu den bekanntesten zählt zum einen das Enzym F_1-ATP-Synthase (bzw. F_1-ATPase), ein komplexes Membranprotein, dessen Rotorteil eine chemisch angetriebene mechanische Drehbewegung ausführt. Diese lässt sich in nanotechnologischen Systemen nutzen, indem man geeignet funktionalisierte Nanobauteile chemisch an den Rotor anbindet. Momentan lassen sich noch keine molekularen Maschinen synthetisch herstellen.

Für die Konstruktion künstlicher Nanoaktuatoren kann weiterhin genutzt werden, dass sich wegen der kurzen Distanzen auch bei moderaten Spannungen hohe Feldstärken realisieren lassen und damit eine deutliche Auslenkung von elektrisch angesteuerten nanostrukturierten Objekten erreichbar ist. So wurden bereits Nanopinzetten realisiert, bei denen zwei Kohlenstoffnanoröhren auf das Ende einer konisch zulaufenden Glasnadel montiert wurden, die so mit zwei Dünnschichtelektroden versehen war, dass ein Feld zwischen den beiden Nanoröhren angelegt werden konnte. Bei Spannungen unter 10 V konnten die beiden Nanoröhren aufeinander zu bewegt und mit ihnen Polymer-Nanopartikel aufgenommen und manipuliert werden (Köhler 2001).

2.6 Informationsverarbeitung und -übermittlung

Die Informations- und Kommunikationstechnik (IuK) ist ein wichtiger und langfristig weiter wachsender Technikbereich mit einem hohen Innovationstempo. Ihre Entwicklung ist eng verknüpft mit der Halbleitertechnik. Für nanotechnologische Entwicklungen bestehen in diesem Bereich vielfältige Anwendungsperspektiven, die in Kapitel VI ausführlich behandelt werden.

Die wichtigsten Anwendungsgebiete der Nanoelektronik im Bereich der Informationsverarbeitung und -übermittlung sind elektronische und optische/optoelektronische Bauelemente. Anwendungen in der Sensorik wurden in Kapitel IV.2.5 beschrieben. Überschneidungen zu den Lebenswissenschaften gibt es durch die molekulare Elektronik (Kapitel IV.2.7 u. VII).

Bis heute ist eine enge Interdependenz zwischen Entwicklungen bei der technischen Basis der IuK-Technik – vor allem von Mikro- oder Optoelektronik – und den Leistungsanforderungen und der Leistungsfähigkeit von informationsverarbeitenden und kommunikationstechnischen Anwendungen zu beobachten. Neben der Fortsetzung der Miniaturisierungs- und Innovationstrends in den klassischen Anwendungsbereichen sollen zukünftige Entwicklungen auch zahlreiche neue Anwendungen für IuK-Techniken möglich machen, die ihrerseits veränderte Anforderungen an technische, ökonomische und auch ökologische Parameter neuer IuK-Komponenten und -Systeme mit sich bringen. Die Vorstellungen reichen dabei von Wegwerfelektronik für die Warensicherung oder die Produktidentifikation über die Integration von IuK-Techniken in weitere Bereiche des Alltagslebens (Beispiele: Intelligentes Haus, wearable electronics) bis hin zur weit gehenden Integration von physischer und digitaler Welt (pervasive computing, ubiquitous computing, ambient intelligence).

Neue Anstöße durch Nanotechnologie werden auch im Bereich der Fertigungstechnik erwartet. Beispiele hierfür sind neue – kostengünstigere oder präzisere – Verfahren für die Herstellung von Elektronikstrukturen wie von klassischen Drucktechniken inspirierte Verfahren (soft lithography) oder solche, die sich self-assembly oder Selbstorganisation zunutze machen (wie die Konstruktion wohl geordneter dünner Halbleiterstrukturen mithilfe von Molekülen oder gentechnisch modifizierten Viren).

Insgesamt wird davon ausgegangen, dass im IuK-Bereich zunächst durch weitere Miniaturisierung von Strukturen bei herkömmlichen Konzepten und Verfahren die Grenze zu der Nanotechnologie zugerechneten Dimensionen überschritten wird (Top-down-Ansatz). Eher zeitversetzt wird der Nutzung von Bottom-up-Ansätzen (etwa von Selbstorganisationskräften für den Aufbau von Schaltkreisen und Systemen) erwartet.

Elektronische Bauelemente

Im Zuge dieser Entwicklungen verschiebt sich die beherrschte Größenordnung zunehmend in die Nanometerdimension. Die charakterisierenden Strukturgrößen von Logik- und Speicherbausteinen in der heute dominierenden CMOS-Technik unterschreiten bereits die 100-nm-Marke, und es wird erwartet, dass die Miniaturisierung auch auf der klassischen Technologieplattform in den nächsten Jahren weiter fortschreiten wird. Kontrovers wird allerdings diskutiert, ob diese Entwicklungen überhaupt dem Bereich der Nanotechnologie zuzuordnen sind. Über den konventionellen Entwicklungspfad hinaus gibt es im Bereich der IuK-Techniken aber zahlreiche weitere – eng miteinander verwobene – Entwicklungen, die der Nanotechnologie zugerechnet werden bzw. aus ihr wichtige Impulse erhalten könnten.

Zum einen werden durch Nanotechnologie über die bislang dargestellte Fortsetzung der herkömmlichen Mikroelektronik hinaus neue Materialien und Strukturen zur Verfügung gestellt, die sich für die Nutzung in elektronischen Bauelementen – aber nicht nur dort – zu eignen scheinen. Vor allem die so genannten Quantenpunkte und die Kohlenstoffnanoröhren sind originär nanotechnologische Strukturen, die entweder in bekannten Bauelementekonzepten Anwendung finden oder auch völlig neue Bauelemente ermöglichen sollen und deren Einsatz in verschiedensten Bereichen erforscht wird. So sind Quantenfilme und -punkte wegen ihrer über die geometrischen Abmessungen beeinflussbaren optoelektronischen Eigenschaften ein geeignetes Ausgangsmaterial für Laser und andere nichtlinear-optische Bauelemente.

Ein hohes Potenzial für die optische Datenübertragung und -verarbeitung bieten auch die so genannten photonischen Kristalle[21], die die Möglichkeit eröffnen, Materialien mit spezifischen optischen Eigenschaften zur Führung, Formung, Wellenlängen-Selektion und Steuerung von Licht zu entwerfen und sogar ein Schalten durch Licht zu realisieren. Aussichtsreiche Anwendungen photonischer Kristalle sind Schaltelemente in optischen Glasfasernetzen sowie optische Transistoren, mit denen rein optische Schaltkreise realisiert werden könnten und die daher die Grundlage für eine zukünftige nur auf Licht basierende Informationsverarbeitung (Photonik) bilden könnten.

Innovationsbeiträge werden auch von anderen Materialien für die Polymer- oder Molekularelektronik erwartet, etwa von organischen Substanzen sowie ggf. deren Verbindung mit den herkömmlichen Elektronikmaterialien. In der molekularen Elektronik lassen sich mithilfe der Nanotechnologie elektronische Bauelemente mit neuen Eigenschaften auf atomarer Ebene zusammensetzen. Grundbausteine sind Moleküle mit besonderen Eigenschaften, die als Schaltelemente genutzt werden können, und molekulare Drähte zur Signalübertragung. Die jeweils in Betracht kommenden Träger zur Signalübertragung (z. B. Elektronen, Photonen, Phononen) werden

[21] Photonische Kristalle weisen einen periodischen Brechungsindex auf und besitzen in Analogie zu Halbleitermaterialien in der Elektronik eine „photonische Bandlücke“ für bestimmte Frequenzbereiche im sichtbaren und IR-Wellenlängenbereich (VDI/FhG-INT 2002).

durch die Reaktionsweise der verwendeten Moleküle bestimmt. Vorteile der Nutzung von Makromolekülen liegen u. a. in der potenziell hohen Packungsdichte, der Nutzung von bekannten, gut synthetisierbaren Molekülen und der Erschließung der dritten Dimension. Probleme liegen dabei u. a. im quantenstatistischen Verhalten einzelner Moleküle für die Schaltzustände.

Der Nanotechnologie zuzurechnende Verfahren ermöglichen zum anderen zahlreiche neue – konventionelle oder neue Materialien nutzende – Konzepte für Komponenten, wobei derzeit in Forschung und Entwicklung eine Vielzahl von mehr oder weniger Erfolg versprechenden Ansätzen verfolgt werden. Bei allen Ansätzen werden bestimmte, nur im Nanometerbereich auftretende Phänomene – vor allem quantenmechanische Effekte – für die Realisierung kleinerer, schnellerer oder anderweitig besserer Bauelemente ausgenutzt. Gleichzeitig wird bei den meisten Ansätzen versucht, an bestehende Techniklinien und Produktionsverfahren anzuknüpfen.

Beispielsweise basieren potenzielle Nachfolger für den die heutige Elektronik prägenden MOSFET-Transistor wie Resonanztunnelelemente oder Einzelelektronlogiken ausschließlich auf quantenphysikalischen Phänomenen. Für zukünftige Speicherelemente werden mehrere Entwicklungsideen verfolgt, die grundsätzlich verschiedene physikalische Prinzipien zur Informationsspeicherung nutzbar machen wollen. Ihnen gemeinsam ist das Ziel: Nichtflüchtige und schnelle Speicher (die die Geschwindigkeit eines elektronischen Arbeitsspeichers mit der Dauerhaftigkeit einer magnetischen Festplatte vereinen sollen) mit niedrigem Energieverbrauch und hoher Integrationsdichte bei möglichst geringen Kosten. Als aussichtsreiche Kandidaten gelten magnetische Speicherelemente (Magnetic RAM, MRAM) und Phasenwechselspeicher (OUM), man arbeitet aber auch an nanomechanischen Speichersystemen (Millipede) und Speicherbausteinen unter Verwendung von Nanoröhren (NRAM).

Sonstige IuK-Komponenten

Ein weiteres Anwendungsfeld sind Anzeigesysteme für die Informationsdarstellung. Neue Prinzipien werden in auf Nanoröhren basierenden Feldemissionsdisplays (FED) oder organischen Leuchtdioden (Organic Light Emitting Diodes, OLEDs) genutzt. Erstere versprechen schnellere Schaltzeiten, einen breiteren Sichtwinkel und eine bessere Umweltverträglichkeit gegenüber den heute dominierenden Flüssigkristallanzeigen, letztere weisen einen vergleichsweise geringen Stromverbrauch auf und sind auf zahlreichen – auch flexiblen – Trägermaterialien herstellbar, weshalb sie sich vor allem für mobile Anwendungen eignen. Darüber hinaus kann bei Displays mit nanostrukturierten Oberflächen (z. B. aus Silizium, künftig auch aus diamantartigen Kohlenstoffverbindungen oder Kohlenstoffnanoröhren) die Lichtausbeute der LEDs erhöht oder mit Nanophosphoren die Auflösung verbessert werden. Bei den auf xerographischen Kopierverfahren basierenden Laserdruckern ermöglicht die Verwendung von Nanopartikeln eine weitere Optimierung.

Neue Architekturen

Um von den Bauelementen zu Systemen der Informations- und Kommunikationstechnik zu gelangen, werden die einzelnen Elemente nach einem bestimmten Funktionsbauplan – einer Architektur – zusammengefügt. Der Übergang von der traditionellen zur Nanoelektronik hat zwar nicht notwendigerweise einen Paradigmenwechsel bei der Architektur von Anwendungssystemen zur Folge, längerfristig werden durch die Nutzung der Nanotechnologie im IuK-Bereich aber auch neue Architekturen möglich bzw. für manche Komponentenkonzepte sogar erforderlich. Ein Beispiel für ein neues (bio-)chemisches Rechnerkonzept ist das so genannte DNA-Computing. Mit großen Mengen DNA in kleinen Volumina sollen eine hohe Speicherdichte und eine massive Parallelität der Informationsverarbeitung erreicht werden. Dem entgegen stehen momentan u. a. noch die beschränkte Rechenkraft bei komplexen Algorithmen und die inhärente Fehlerhaftigkeit von DNA-Rechenoperationen. Anwendungspotenziale werden daher sehr unterschiedlich eingeschätzt. Ein anderes neues Konzept sind die Quanteninformationstechniken (Quanten-Computing), die zum großen Teil aber noch in frühen Entwicklungsphasen stecken.

2.7 Lebenswissenschaften

Zu den Lebenswissenschaften (Life Sciences) zählen im engeren Sinne Biologie, Human- und Veterinärmedizin. Im weiteren Sinne gehören auch Pharmazie, Kosmetik, Ernährungs-, Agrar-, Forst- und Umweltwissenschaften dazu. Auf Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften wird ausführlich in Kapitel VII eingegangen.

Es können zwei prinzipielle Transferrichtungen unterschieden werden: Einerseits sind die Lebenswissenschaften ein bedeutender Anwendungsbereich nanotechnologischer Entwicklungen; andererseits können die Lebenswissenschaften durch die Untersuchung der Funktionsprinzipien natürlicher Lebensformen auf molekularer Ebene einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung der Nanotechnologie leisten.

Anwendungsziele liegen u. a. in der Verbesserung der Lebensqualität durch Fortschritte bei medizinischer Diagnose und Therapie, Leistungssteigerungen beim Menschen und Ertragssteigerungen bei Tieren und Pflanzen. Mögliche Anwendungen sind u. a.:

- Analytik und Diagnostik (Antikörpernachweis, Lab-on-a-Chip, medizinische Biosensoren, Tumortherapie etc.), nanotechnologische Herstellung von Wirkstoffen;
- ortsgenaue(r) Wirkstofftransport und -deposition (z. B. Drug-Delivery-Systeme, Nanofähren);

– biokompatible Materialien und Oberflächen: künstliche Gewebe und Knochen (tissue engineering), nanotechnologisch beschichtete und nanoelektronische – insbesondere neurologische – Implantate;
– Biomimetik und molekulare Motoren, Nanorobotik für Forschung, Diagnostik und Therapie.

Diagnostik und Analytik

In der Medizin eröffnen sich neue Möglichkeiten für die Diagnose und die Verabreichung von Wirkstoffen. Beispielsweise sollen Lab-on-a-Chip-Systeme und Nanosensoren es künftig erlauben, die menschliche Gesundheit differenziert zu überwachen. In Lab-on-a-chip-Systemen werden als Marker für die zu untersuchenden Substanzen beispielsweise Goldnanopartikel, Halbleiternanokristalle oder auch magnetische Nanopartikel eingesetzt. Die Detektierung kann u. a. mittels Laserfluoreszenzspektroskopie, Magnetfeldmessungen, Elektronenmikroskopie oder optischem Farbumschlag erfolgen. Letzteres Verfahren bietet den Vorteil, dass das Testergebnis ohne jedes Instrument angezeigt wird; es eignet sich damit potenziell auch für die Selbstdiagnose durch Patienten.

Erkenntnisse aus nanoskopischen Untersuchungsmethoden für biologische Systeme (Membranen, DNA, Proteine etc.) bilden eine wesentliche Grundlage für künftige Therapieformen und für verbesserte Pharmaka. Beispielsweise bietet das Rasterkraftmikroskop (Atomic-Force Microscope, AFM) gegenüber anderen Mikroskopen mit vergleichbarer Auflösung den Vorteil, biologische Proben in physiologischer Umgebung (d. h. in wässriger Lösung) analysieren zu können. Damit ist es auch möglich, Wechselwirkungen zwischen einzelnen Molekülen zu untersuchen. Bei einer Neuentwicklung, dem Photonischen Kraftmikroskop (Photonic Force Microscope, PFM), wird die dreidimensionale Abtastung beliebiger Oberflächen durch die Verwendung einer optischen Pinzette ermöglicht.

Transport und Dosierung

Ein wesentliches Anwendungspotenzial der Nanotechnologie liegt im kontrollierten und targetorientierten Transport von medizinisch wirksamen Stoffen (Drug Delivery). Hierbei soll u. a. das Potenzial wasserunlöslicher und daher bislang schwierig anwendbarer Wirkstoffe mithilfe nanoskaliger Transportsysteme in nutzbare Medikamente überführt werden. Solche nanotechnologischen Transportsysteme können aus sich selbstorganisiert bildenden Hohlkörpern (Liposome, Fullerene, Dendrimere etc.) oder durch Ankopplung an Nanopartikel hergestellt werden. Ziel ist es, Wirkstoffe durch Einbau in Nanopartikel mit spezifischer Oberflächenfunktionalisierung vor frühzeitigem Abbau zu schützen und – weitgehend nebenwirkungsfrei – selektiv in bestimmte Zellen einzubringen und freizusetzen. Nanopartikel können Zellwände durchdringen und damit lokale Wirkstoffdeposition ermöglichen, u. a. auch unter Überwindung physiologischer Barrieren wie der Blut-Hirn-Schranke.

Zerstörung biologischen Gewebes

Oberflächenmodifizierte magnetische Nanopartikel können als Anti-Tumor-Therapeutika eingesetzt werden. Durch äußere elektromagnetische Wechselfelder kann nach der Anreicherung der Krebszellen mit eisenhaltigen Nanopartikeln eine lokale Überhitzung (magnetische Hyperthermie) induziert werden, die die Krebszellen selektiv tötet und das intakte Gewebe unbeschadet lässt.

Implantate und Beschichtungen

Nanotechnologische Beschichtungen für Implantate sowie für medizintechnische Geräte und Instrumente sind in ihrer Entwicklung teilweise schon relativ weit fortgeschritten. Durch ultradünne Beschichtung oder die topographische Strukturierung von Medizin- und Dentalwerkstoffen kann deren Biokompatibilität verbessert werden (geringeres Abstoßungsrisiko). So erleichtern organische Zwischenschichten zwischen Implantatoberfläche und bioaktiver Komponente des Körpers die Besiedlung mit lebenden Zellen und fördern das Zellwachstum zur Integration des Fremdkörpers (z. B. bei implantierbaren Blutzuckersensoren, Bypässen aus Kunststoffen). Längerfristig sind auch nanoelektronische Implantate, vor allem für Nervensystem und Sinnesorgane, denkbar (Basler & Hofmann 2002).

Dabei kann auch eine Nachahmung natürlicher Oberflächen, z. B. von Knochen und Zähnen, zu optimierten Gewebereaktionen sowie optimiertem mechanischen Verhalten führen. Ein Beispiel hierfür sind Implantatbeschichtungen aus Hydroxylapatit (Grundsubstanz von Knochen und Zähnen), das in nanokristalliner Form auf Titanimplantate aufwachsen kann. Im Bereich Tissue Engineering (Nachzüchtung menschlichen Gewebes) bietet die Nanotechnologie langfristig ein großes Potenzial, z. B. für die Herstellung von künstlichem Hautersatz.

Biomimetik

Unter Biomimetik werden Anwendungen subsumiert, bei denen aus dem Verständnis biologischer Funktionsmechanismen heraus eine technische Umsetzung nach dem Bottom-up-Prinzip angestrebt wird. Ein Beispiel ist die Anwendung des biologischen Farbstoffs Bakteriorhodopsin, der natürlicherweise in der Zellwand eines Bakteriums vorkommt, als Sicherheitspigment. Ein weiteres Beispiel sind nanotechnologische Beschichtungen für medizinische Geräte (z. B. zur Unterdrückung der Blutgerinnung).

Anwendungen in anderen Bereichen

Bei der Ernährung stehen derzeit nanotechnologisch hergestellte Verpackungen sowie Farb- und Zusatzstoffe im Vordergrund. Künftig dürfte Nanotechnologie auch im Bereich des Functional Food eine Rolle spielen, wo sie die Verfügbarkeit bioaktiver Substanzen erhöht.

In Kosmetika werden Nanopartikel bereits eingesetzt, z. B. für Sonnenschutzmittel mit verbesserten Eigenschaften. Eingesetzt werden z. B. Titan- oder Zinkoxidpartikel (unter 20 nm Durchmesser) zur UV-Absorption. Darüber hinaus werden Nanopartikel aus verschiedenen Metalloxiden zur Verbesserung des Hautgefühls, als Faltenaufheller und für Effektpigmente eingesetzt. Die Partikel halten Wirkstoffe länger bioaktiv und können die biologischen Barrieren der Haut teilweise durchdringen. In den letzten Jahren sind zu diesem Zweck bereits eine Reihe von Nanoemulsionen entwickelt worden, die weniger Zusatz- und Konservierungsstoffe enthalten und damit hautverträglicher sind.

In der Landwirtschaft, bei Pflanzenproduktion und Veterinärmedizin sind nanotechnologische Ansätze bisher selten, da der Preis bei neuen Anwendungen in diesen Gebieten eine wesentliche Rolle spielt. Mittelfristig können diese Bereiche der Lebenswissenschaften jedoch voraussichtlich von Fortschritten bei der Medizin profitieren, welche die preisgünstigere Entwicklung und Herstellung von Folgeprodukten für andere Anwendungsbereiche erlauben.

2.8 Sicherheit und Rüstung

In der militärischen Rüstung erscheinen die Potenziale der Nanotechnologie beträchtlich, sie eröffnen die Aussicht auf verbesserte Waffen, innovative Materialien und neue Anwendungsbereiche. Obwohl die Realisierung dieser Potenziale noch nicht weit vorangeschritten ist, stellen sich schon jetzt Fragen in den Bereichen Kriegsführung, Spionage, Krisenstabilität, Rüstungsdynamik und Schutz der Privatsphäre. Mit den militärrelevanten Programmen und Anwendungen wird zugleich auch der Ruf nach neuen Richtlinien, Sicherheiten und rüstungskontrollpolitischen Beschränkungen laut – und nach einem gewissenhaften Umgang mit der neuen Technologie insgesamt.

Dieses Kapitel enthält einen Überblick über möglich militärische Anwendungen der Nanotechnologie. Auf sicherheitspolitische Implikationen wird in Kapitel IX.3.3 eingegangen.

In den USA wird die mögliche militärische Bedeutung der Nanotechnologie seit geraumer Zeit diskutiert. Bereits in der Vorbereitungsphase der „National Nanotechnology Initiative“ (NNI) – in der zweiten Hälfte der 1990er-Jahre – thematisierten die zuständigen Wissenschaftler und Regierungsvertreter diverse militärische Anwendungsoptionen. Auch der jetzige Präsident Bush ist entschlossen, durch nanotechnologisch gestützte Weiter- und Neuentwicklungen von Waffensystemen (und des „Systems Soldat“) die Möglichkeiten von Kriegsführung und Friedenssicherung auszuweiten. Dabei werden zum Teil lange Zeiträume ins Auge gefasst. Die deutsche Rüstungsforschung beschränkt sich dagegen eher auf kurz- bis mittelfristige Anwendungen, hauptsächlich im defensiven Bereich, die auf Entwicklungen im zivilen Nanobereich fußen.

Das US-amerikanische Verteidigungsministerium beansprucht für sich, die Bedeutung der Nanotechnologie bereits in den frühen 1980er-Jahren erkannt zu haben (Lau 2002). Nanotechnologie und Nanowissenschaften machen einen der derzeit sechs Forschungsbereiche aus, die von dem Ministerium als strategisch wichtig eingeschätzt werden. Das Ministerium erwartet, dass Entwicklungen in diesem Forschungsbereich Auswirkungen auf alle Bereiche der Kriegsführung haben werden. Durch Nanotechnologie deutlich verbesserte Fähigkeiten erhoffen sich die Verantwortlichen u. a. in den Gebieten „C4ISR“ („command, control, communications, computers, intelligence, surveillance, and reconnaissance“), bei Panzerungen, Waffen und Plattformen (durch Verkleinerung, Gewichtsverringerung und/oder Steigerung der Leistungsfähigkeit), beim Schutz vor biologischen und chemischen Waffen (durch bessere Entdeckungs- und Neutralisierungsmöglichkeiten), bei unbemannten Trägersystemen für Land, See und Luft und bei der Entwicklung von Weltraumminisatelliten (Lau 2002, S. 308).

Tatsächlich dürften – schon aufgrund ihres Querschnittscharakters – viele kurz- und mittelfristig zu erwartende nanotechnologische Innovationen auch die Leistungsfähigkeit militärischer Systeme beeinflussen. Die folgende Analyse fasst daher derzeit erkennbare Auswirkungen von nanotechnologischen Entwicklungen auf militärisches Gerät und Personal zusammen (vgl. VDI/FhG-INT 2002, S. 121 ff.).

Militärische Plattformen und Trägersysteme

Insbesondere für Land- und Luftfahrzeuge bietet sich die Möglichkeit, herkömmliche Strukturwerkstoffe wie Stahl, Aluminium und Kunststoff zum Teil durch festere und leichtere Materialien zu ersetzen. Beispiele für solche Lösungen sind nanopartikelverstärkte Polymere, Nanoröhren-Verbundwerkstoffe und nanostrukturierte Keramiken. Auch mit besseren Oberflächeneigenschaften ist zu rechnen. Weitere Möglichkeiten ergeben sich aus der Nutzung von speziellen nanoskaligen Strukturwerkstoffen, die zu Verbesserungen beim direkten Schutz militärischer Fahrzeuge (Panzerungen) führen. Des Weiteren bieten funktionale Nanowerkstoffe und nanostrukturierte Oberflächen Anwendungspotenziale für den so genannten indirekten Schutz (Tarnen und Täuschen). So wird z. B. über „intelligente“ Oberflächenbeschichtungen nachgedacht, die ihre Farbe wechseln können (Chamäleoneffekt). Eine weitere Option ist die Verringerung der Radarsignatur (Stealth) durch geeignete Anpassung der Absorptionseigenschaften für elektromagnetische Strahlung.

Wichtige Auswirkungen der Nanotechnologie auf den Betrieb militärischer Trägersysteme sind bei der Wandlung und Speicherung von Energie zu erwarten. Zu nennen sind z. B. effizientere Solarzellen, geeignete Membranen und Katalysatoren zum Betrieb von Brennstoffzellen sowie leistungsgesteigerte Batterien, Akkumulatoren und Kondensatoren. Auch bei

Verbrennungsmotoren und Turbinen sind hinsichtlich Gewicht und Wirkungsgrad deutliche Verbesserungen durch die Verwendung leichterer und festerer nanostrukturierter Hochtemperaturwerkstoffe zu erwarten.

Nanoskalige elektronische, sensorische und elektromechanische Komponenten könnten die Steuerung und Regelung von Fahrzeugen leistungsfähiger und robuster machen. Der bereits bestehende Trend zu unbemannten/autonomen Systemen in den Bereichen Luft, See und Weltraum könnte sich hierdurch noch verstärken. Auch die Entwicklung unbemannter militärischer Landfahrzeuge könnte hiervon profitieren.

Aufklärung

In der gesamten militärischen Aufklärung gibt es eine Vielzahl von möglichen Anwendungen, die auf der Nutzung von nanotechnologischen Komponenten für Sensoren, Sensorsysteme und Sensornetze basieren. Sie erstrecken sich sowohl auf den Bereich elektromagnetischer Strahlung (Radar, Infrarot, UV) als auch auf die akustischen Sensoren. Dabei steht die Leistungssteigerung der dazugehörigen Signalverarbeitungs- und Kommunikationskomponenten im Vordergrund. Auch die Realisierung von noch utopisch klingenden Konzepten wie Sensornetze, die aus sehr vielen flächenhaft ausgebrachten relativ dummen Einzelsensoren bestehen und durch Selbstorganisation und Kommunikation eine Schwarmintelligenz erreichen, könnte durch Nanotechnologie möglich werden.

Ein Potenzial für militärische Anwendungen bieten biologische und chemische Nanosensoren. So lassen sich miniaturisierte bioanalytische Geräte (Lab-on-a-Chip-Systeme) zur Detektion von Kampfstoffen einsetzen. Mit solchen Sensorsystemen können z. B. Kampfstoffe aus pathogenen Mikroorganismen oder Toxinen anhand der molekularen Erkennung ihrer Bestandteile mit nukleinsäurebasierten oder immunologischen Detektionsverfahren ausgemacht werden.

Waffen und Munition

Auch der Bereich der Waffen und Munition wird unmittelbar von den verbesserten sensorischen Fähigkeiten sowie von der Erhöhung der Rechenleistung und Speicherkapazität durch Nanotechnologie beeinflusst. So dürfte die hieraus resultierende Zunahme bei der Intelligenz der Suchköpfe den Autonomiegrad und die Treffgenauigkeit von Lenkflugkörpern weiter steigern. Im Bereich der konventionellen und elektromagnetischen Rohrwaffen sind neben Leistungssteigerungen durch die Verwendung neuer Materialien auch Leistungssteigerungen bei der Feuerleitung durch verbesserte Sensorik und Informationstechnik zu erwarten.

Bei den Geschossen könnten sowohl Geschwindigkeit als auch Durchschlagsfähigkeit durch neue nanostrukturierte Materialien erhöht werden. Untersucht wird z. B. die Verwendung von nanokristallinem Wolfram statt abgereichertem Uran für panzerbrechende Munition (VDI nachrichten 2001). Damit könnten die USA, Großbritannien und andere Staaten Forderungen nach einem Verzicht auf die umstrittene so genannte Uranmunition nachkommen. Eine weitere Option ist die Entwicklung nanoskaliger Pulver für den Einsatz in Treibmitteln und Sprengstoffen. Aufgrund der vergrößerten Oberfläche der Nanopartikel lassen sich Energieausbeute und Explosionsgeschwindigkeit erhöhen.

Noch relativ unklar ist das Potenzial nanotechnologischer Entwicklungen im Bereich der Massenvernichtungswaffen. So gibt es spekulative Veröffentlichungen zum Prinzip von speziellen Initialzündern, die den Bau sehr kleiner Kernfusionswaffen ermöglichen würden. Im Bereich der biologischen und chemischen Waffen sind z. B. kleine Nano-Trägerkapseln möglich, die einen Wirkstoff einschließen. Sie könnten zur Einschleusung in den Körper bzw. in Körperzellen genutzt werden, um dort gezielt den Wirkstoff freizusetzen. Denkbar sind auch verbesserte Detektionsmöglichkeiten durch die Verwendung von Nanopartikeln. Eine direkte Möglichkeit der Nutzung von Nanotechnologie für biologische und chemische Waffen besteht ggf. bei den Instrumentarien der Nanosynthese (Rastersondentechniken, Selbstorganisation) zum gezielten Design neuer Wirkstoffe.

Personen

Viele der genannten nanotechnologischen Entwicklungen in den Bereichen Werkstoffe, Informationstechnik und Biotechnologie werden vermutlich große Auswirkungen für das militärischen Personal haben. Besonders hervorzuheben sind die zu erwartenden Veränderungen auf der Ebene der persönlichen Ausstattung. Zur Rolle des einzelnen Soldaten auf dem Gefechtsfeld gibt es seit einigen Jahren in den modernen Armeen eine prinzipiell neue Sichtweise, die durch den Begriff „Soldier as a System“ charakterisiert wird. Insbesondere in den USA wird dieses Konzept mit enormem Aufwand betrieben, Planungen werden jedoch auch in Deutschland angestellt. Im Vordergrund steht das Bestreben, Soldaten mit zusätzlicher funktioneller Ausrüstung auszustatten, ohne das Gewicht der Ausrüstung wesentlich zu erhöhen. Neben den informationstechnischen Komponenten (Displays, Sensoren, Computer), der Bewaffnung und der Energieversorgung sind durch Nanotechnologie insbesondere neuartige sensorische und aktorische Möglichkeiten zur direkten medizinischen Kontrolle und Betreuung des Soldaten zu erwarten.

Auch bei der Bekleidung gibt es Entwicklungsbestrebungen. Forscher der City University of New York haben beispielsweise so genannte Molekulare Dolche entwickelt, die auf Kleidung anheftende Mikroorganismen abtöten können. Die Killer-Kleider könnten demnächst auf den Markt kommen und etwa bei Uniformen mit Anthrax-Schutz Einsatz finden. Die US-Armee testet diese Nanodolche bereits.

In den USA wird das Potenzial der Nanotechnologie für die zukünftige Ausstattung des Soldaten inzwischen als so bedeutend eingestuft, dass mit dem Aufbau eines eigenen Forschungsinstitutes (Institute for Soldier Nanotechnologies) begonnen wurde. Das Institut ist Teil des Massachusetts Institute of Technology (MIT), die US-Armee hat 50 Mio. US-Dollar aufgewendet. Zudem beteiligen sich Sponsoren aus der Wirtschaft. An dem Institut wird zu der übergeordneten Frage geforscht, wie Soldaten besser gegen feindliche Attacken und Umwelteinflüsse geschützt werden können. Endziel ist die Entwicklung einer Kampfausrüstung, die High-Tech-Fähigkeiten, leichtes Gewicht und Tragekomfort kombiniert. Zu den anvisierten High-Tech-Fähigkeiten gehören u. a. Kommunikationsfähigkeiten und medizinische Diagnosefähigkeiten.

2.9 Übersicht zum Entwicklungsstand

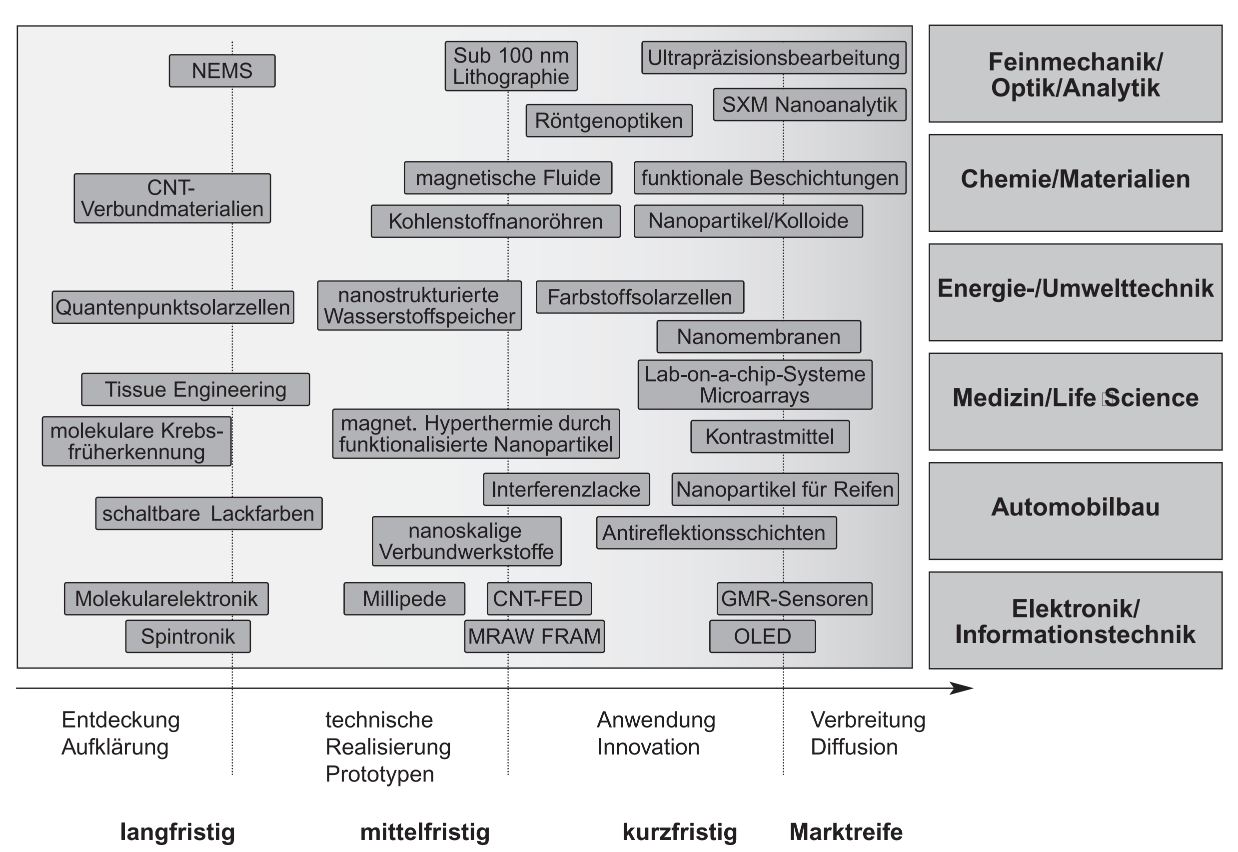
In den aufgeführten Anwendungsbereichen der Nanotechnologie sind Produkte, Produktideen und Konzepte identifizierbar, deren Realisierungszeitpunkt von der Gegenwart bis weit in die Zukunft reicht. Der Entwicklungsstand der aufgeführten Anwendungen lässt sich nur grob abschätzen. Die Gründe hierfür liegen u. a. in der Vielfalt nanobasierter Effekte – von denen hier nur ein (repräsentativer) Ausschnitt dargestellt werden konnte – und in permanenten Weiterentwicklungen.

Abbildung 17 gibt exemplarisch einen Eindruck vom aktuellen Entwicklungsstand ausgewählter Anwendungsfelder der Nanotechnologie. Deutlich wird, dass sich eine Reihe von Anwendungen bereits in der Phase der Realisierung befinden, wobei es sich eher um Top-down-Ansätze handelt. Neuere Anwendungen – eher die Bottom-up-Ansätze – sind erst mittel- bis langfristig zu erwarten.

Eine Zusammenstellung zum Entwicklungsstand nanobasierter Produkte, Bauelemente, Komponenten und Systeme – mit Bezug zu ihrer chemischen Zusammensetzung, ihrer nanoskaligen Basisstruktur und ihren Herstellungsmöglichkeiten – findet sich in den Anhängen.

Abbildung 17

Entwicklungsstand der Nanotechnologie in ausgewählten Anwendungsfeldern



Quelle: VDI/FhG-INT 2002, S. 67

3. Zusammenfassung

Die Verkleinerung von Abmessungen in den Nanometerbereich hinein führt oft zu charakteristischen, für neue Anwendungen nutzbaren Eigenschaften von Stoffen und Werkstoffen, die bei makroskopischen Stücken des gleichen Materials nicht auftreten. Dazu gehören z. B. deutlich höhere Härte, Bruchfestigkeit und -zähigkeit bei niedrigen Temperaturen sowie Superplastizität bei hohen Temperaturen, die Ausbildung zusätzlicher elektronischer Zustände, hohe chemische Selektivität der Oberflächenstrukturen und eine deutlich vergrößerte Oberflächenenergie.

Durch den kontrollierten Aufbau makroskopischer Körper aus atomaren und molekularen Bausteinen lassen sich deren Eigenschaften gezielt einstellen. Das Verständnis der molekularen Grundlagen neuer Materialien eröffnet Perspektiven für die Herstellung neuer schaltbarer Werkstoffe, die mit konventionellen Methoden nicht herstellbar sind.

Insgesamt gesehen ist der Entwicklungsstand von Produkten, Produktideen und Konzepten der Nanotechnologie sehr unterschiedlich; ihr Realisierungszeitpunkt reicht von der Gegenwart bis weit in die Zukunft. Eine Reihe von Anwendungen befindet sich bereits in der Phase der Realisierung, wobei es sich eher um Top-down-Ansätze handelt. Neuere Anwendungen – eher die Bottom-up-Ansätze – sind erst mittel- bis langfristig zu erwarten.

Oberflächenfunktionalisierung und -veredelung

Unter marktrelevanten Aspekten befindet sich die Nanotechnologie im Bereich Oberflächenfunktionalisierung und -veredelung bereits in einem relativ fortgeschrittenen Stadium. Teilweise bereits in der industriellen Anwendung befinden sich Nanomultischichten und Nanoverbundschichten, die sich durch verbesserte mechanische und tribologische Eigenschaften auszeichnen. Weitere Beispiele sind quasi selbstreinigende Oberflächen, die gleichzeitig hydrophobe und oleophobe Eigenschaften aufweisen. Auch schon im Einsatz befinden sich optisch-funktionale Oberflächen für Fassaden, Kraftfahrzeuge, Solarzellen etc. (z. B. zur Entspiegelung, Sonnenschutzverglasung, Antireflexbeschichtung für Instrumententafeln).

Durch den Zusatz von Nanopartikeln in konventionelle Lacke ergeben sich neue und verbesserte, nanobasierte Farbeffekte. In der Anwendung befinden sich bereits Pigmentruße aus agglomerierten Nanopartikeln in hochwertigen schwarzen Lacken. Über schaltbare bzw. in der Farbe veränderbare Lacke und selbstheilende Lacke wird diskutiert.

Katalyse, Chemie und Werkstoffsynthese

In der chemischen Industrie werden katalytische Nanopartikel bereits eingesetzt. Im Nanobereich werden auch völlig neue Materialien als Katalysatoren erschlossen (z. B. Gold-Nanopartikel). Nanoreaktoren (z. B. Dendrimere) ermöglichen eine völlig neue Art der räumlichen Prozesskontrolle im Nanometermaßstab. Durch so genannte supramolekulare Wirt-Gast-Strukturen eröffnen sich neue Synthesewege in der organischen Chemie. Die Regio- und Stereoselektivität von Katalysatoren kann erhöht werden. Oberflächenaktive Membranen, nanoporöse (Bio-)Filter und Adsorptionsmittel sind aus nanotechnologischer Sicht optimierbar, z. B. zur Abwasseraufbereitung, Schadstoffbeseitigung und Nebenproduktabtrennung.

Durch die nanotechnologische Verbesserung bereits verfügbarer Katalysatoren (z. B. Zeolithe) werden Trägerkatalysatoren mit neuen Eigenschaften zugänglich. Durch ein kontrolliertes Aufwachsen der Katalysatorpartikel auf nanoskalige Trägermaterialien wird eine präzise Kontrolle der Katalysatoreigenschaften möglich. In Zukunft wird es verstärkt möglich sein, heterogene Katalysatoren für gewünschte Reaktionen maßzuschneidern. Durch molekulares Prägen (Molecular Imprinting) gelingt der Aufbau spezifischer Polymere (MIPs) mit hoher Selektivität. Dabei können biomimetische, enzymanaloge Katalysatoren gewonnen werden, die Vorteile gegenüber Enzymen u. a. in ihrer Einsetzbarkeit bei extremen Reaktionsbedingungen aufweisen.

Energieumwandlung und -nutzung

Mit dem Einsatz der Nanotechnologie kann die Effizienz der Energieumwandlung erhöht werden. Dabei stehen materialseitige Verbesserungen im Vordergrund (z. B. Einsatz nanotechnologischer Werkstoffe in der Photovoltaik und in Brennstoffzellen).

Ein weiterer Schwerpunkt ist die verlustarme Speicherung von Energie. Dabei stellt die effiziente Speicherung von Wasserstoff nach wie vor eine Herausforderung dar. Durch Methoden der Mikro- und Nanostrukturierung lässt sich etwa der Massenanteil des Wasserstoffs bei chemischer Speicherung erhöhen. An der Speicherung von Wasserstoff in Nanoröhren aus Kohlenstoff und anderen Fulleren-Derivaten wird – in Erwartung höherer Massenanteile – weiter geforscht.

Nanomaterialien können zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Batterien, von Mini-Akkus (z. B. durch Verwendung von Nanoröhren in Lithium-Ionen-Akkus) und bei elektrochemischen Kondensatoren (Superkondensatoren) genutzt werden. Zudem ist die Kombination von Superkondensatoren mit Batterien auch für Traktionszwecke vielversprechend (z. B. Speicherung der Bremsenergie im Elektromobil). Die hohen Verluste beim Stromtransport machen die Verwendung von supraleitenden Leitungen interessant. Dabei setzt man Hoffnung auf Nanoröhren, bei denen Supraleitfähigkeit bei Raumtemperatur für möglich gehalten wird.

Konstruktion

Entscheidende Materialgrößen (Härte, Verschleißfestigkeit etc.) können durch die Einführung charakteristischer Strukturgrößen im Nanometerbereich gezielt verbessert werden. Viele Strukturanwendungen nanokristalliner Werkstoffe ergeben sich aus einer Verteilung von Nano-

partikeln in einer keramischen, metallischen oder Polymer-Matrix.

Beispielsweise verbessert das Einbringen von nanoskaligen Teilchen in Metallen deren mechanische Eigenschaften, womit ein wesentlicher Beitrag zum Leichtbau geleistet werden kann. Mit Nanopartikeln versehene Polymere besitzen Merkmale, die zwischen denen von organischen Polymeren und anorganischen Keramiken liegen. Einsatzmöglichkeiten derart optimierter Materialien finden sich in besonders beanspruchten Bereichen des Leichtbaus oder in Hochtemperaturanwendungen, aber auch in Massenanwendungen wie Kunststoff-Gehäusen oder -Verkleidungen. Hervorzuheben ist z. B. das duktile Verhalten von nanostrukturierten Keramiken, die bisher als ausschließlich spröder Werkstoff bekannt waren. Für die Praxis ergibt sich daraus eine Vielzahl an Innovationen in der keramischen Technologie. Wesentliche Eigenschaftsverbesserungen sind auch bei Baustoffen durch Beimischen von Nano-Zusatzstoffen möglich (z. B. Hochleistungsbetone mit höhere Druckfestigkeiten bei verbessertem Verschleiß- und Erosionswiderstand).

Nanosensoren und Aktuatoren

Für die Vermessung von Mikro- und Nanostrukturen werden zerstörungsfreie Messverfahren mit Nanometergenauigkeit benötigt. Eine Vielzahl von Sensoren wird durch die Nanotechnologie erst ermöglicht. Zur Detektion mechanischer Größen werden z. B. Magnetfeldsensoren verwendet (in Airbag-Systemen, Leseköpfen von Festplattenspeichern etc.). Mit Infrarotsensoren lässt sich eine hohe thermische und räumliche Auflösung realisieren; den höchsten Entwicklungsstand haben zurzeit Infrarot-Detektormosaike aus Quantentrog-Infrarot-Photodetektoren. Im Arznei- und Lebensmittelbereich werden kommerziell Markierungen (Thermolabels) auf Nanotechnologiebasis angeboten, die durch Verfärbung Temperaturüber- oder -unterschreitung anzeigen. Mit dem Rasterwärmemikroskop kann die thermische Leitfähigkeit bzw. Temperaturverteilung z. B. von elektronischen Bausteinen hochauflösend vermessen werden. Viele Oxide kommen erst in nanokristalliner Form für eine Verwendung als Sensormaterial, etwa für Chemosensoren (z. B. Glukosesensor mit Farbumschlag zur Bestimmung des Blutzuckergehaltes), infrage. Ein Beispiel für Biosensoren sind so genannte Lab-on-a-Chip-Systeme.

Die Natur hat diverse Systeme hervor gebracht, die im Nanometerbereich Bewegungen ausführen. Natürliche Motoren für Linearbewegungen und Drehbewegungen sind Proteine. Diese lassen sich zukünftig in chemischen oder gentechnischen Abwandlungen oder als biomimetischer Nachbau möglicherweise für die Konstruktion komplexerer Nanomaschinen nutzen. Derzeit lassen sich noch keine molekularen Maschinen synthetisch herstellen.

Informationsverarbeitung und -übermittlung

Die wichtigsten Anwendungsgebiete der Nanoelektronik im Bereich der Informationsverarbeitung und -übermittlung sind elektronische und optische/optoelektronische Bauelemente. Für neue Entwicklungen reichen die Vorstellungen von Wegwerfelektronik für die Warensicherung oder die Produktidentifikation über die Integration von IuK-Techniken in weitere Bereiche des Alltagslebens (Beispiele: Intelligentes Haus, wearable electronics) bis hin zur weitgehenden Integration von physischer und digitaler Welt (z. B. ubiquitous computing). Durch Nanotechnologie werden auch im Bereich der Fertigungstechnik neue Anstöße erwartet (z. B. neue kostengünstigere oder präzisere Verfahren).

Die technisch beherrschte Größenordnung von Logik- und Speicherbausteinen in der heute dominierenden CMOS-Technik verschiebt sich zunehmend in die Nanometerdimension (Quantenpunkte, Kohlenstoffnanoröhren). Photonische Kristalle weisen ein Einsatzpotenzial für rein optische Schaltkreise auf, etwa als Grundlage für eine zukünftige nur auf Licht basierende Informationsverarbeitung (Photonik). In der molekularen Elektronik lassen sich mithilfe der Nanotechnologie elektronische Bauelemente mit neuen Eigenschaften auf atomarer Ebene zusammensetzen mit Vorteilen u. a. in einer potenziell hohen Packungsdichte.

Neue Konzepte für Komponenten beruhen vor allem auf der Nutzung quantenmechanischer Effekte für die Realisierung kleinerer, schnellerer oder anderweitig besserer Bauelemente (z. B. neue Transistoren mit Einzelelektronlogiken, nanomechanische Speichersysteme). Längerfristig werden durch die Nutzung der Nanotechnologie im IuK-Bereich aber auch neue Architekturen möglich. Ein Beispiel für ein neues biochemisches Rechnerkonzept ist das so genannte DNA-Computing.

Lebenswissenschaften

Durch den Einsatz der Nanotechnologie werden u. a. Verbesserungen in der Lebensqualität durch Fortschritte bei medizinischer Diagnose und Therapie, Leistungssteigerungen beim Menschen und Ertragssteigerungen bei Tieren und Pflanzen erwartet. Mögliche Anwendungen sind unter anderem in der Analytik und Diagnostik, der nanotechnologischen Herstellung von Wirkstoffen, dem ortsgenauen Wirkstofftransport, der Herstellung biokompatibler Materialien und Oberflächen und der Biomimetik zu finden.

Neue Möglichkeiten für die Diagnose und die Verabreichung von Wirkstoffen eröffnen sich beispielsweise mit Lab-on-a-Chip-Systemen, welche sich potenziell auch für die Selbstdiagnose durch Patienten eignen. Ein wesentliches Anwendungspotenzial der Nanotechnologie liegt im kontrollierten und targetorientierten Transport von medizinisch wirksamen Stoffen mit dem Ziel, diese vor frühzeitigem Abbau zu schützen und – weitgehend nebenwirkungsfrei – selektiv in bestimmte Zellen einzubringen (u. a. Einsatzmöglichkeiten in der Tumordiagnostik und als Anti-Tumor-Therapeutika). Nanotechnologische Beschichtungen für Implantate sowie für medizintechnische Geräte und Instrumente mit verbesserter Biokompatibilität sind in ihrer Entwicklung teilweise schon relativ weit fortgeschritten. Bei nanotechnologischen Beschichtungen für medizinische Geräte (etwa zur Unterdrückung der Blutgerinnung) fließen biomimetische Entwicklungen ein.

Bei der Ernährung stehen derzeit nanotechnologisch hergestellte Verpackungen sowie Farb- und Zusatzstoffe im Vordergrund. Künftig dürfte Nanotechnologie auch im Bereich des „Functional Food" eine Rolle spielen, wo sie die Verfügbarkeit bioaktiver Substanzen erhöht. In Kosmetika werden Nanopartikel bereits eingesetzt, z. B. für Sonnenschutzmittel mit verbesserten Eigenschaften.

Sicherheit und Rüstung

Der Einsatz der Nanotechnologie in der Rüstung eröffnet Wege zu verbesserten Waffen, innovativen Materialien und neuen Anwendungsbereichen. Bei Land- und Luftfahrzeugen könnten herkömmliche Strukturwerkstoffe zum Teil durch festere und leichtere Materialien ersetzt werden. Zudem könnten Verbesserungen beim direkten (Panzerungen) und indirekten Schutz militärischer Fahrzeuge (Tarnen und Täuschen z. B. durch Farbwechsel mit „intelligenten" Oberflächenbeschichtungen) erreicht werden. Wichtige Auswirkungen der Nanotechnologie auf den Betrieb militärischer Trägersysteme sind bei der Wandlung und Speicherung von Energie zu erwarten (z. B. effizientere Solarzellen, geeignete Membranen und Katalysatoren zum Betrieb von Brennstoffzellen sowie leistungsgesteigerte Batterien). Nanoskalige elektronische, sensorische und elektromechanische Komponenten könnten die Steuerung und Regelung von Fahrzeugen leistungsfähiger und robuster machen. Der bereits bestehende Trend zu unbemannten/autonomen Systemen in den Bereichen Luft, See und Weltraum könnte sich hierdurch noch verstärken.

In der militärischen Aufklärung gibt es eine Vielzahl von möglichen Anwendungen, die auf der Nutzung von nanotechnologischen Komponenten für Sensoren, Sensorsysteme und Sensornetze basieren. Auch der Bereich der Waffen und Munition wird unmittelbar von den verbesserten sensorischen Fähigkeiten sowie von der Erhöhung der Rechenleistung und Speicherkapazität durch Nanotechnologie beeinflusst. Eine weitere Option ist hier die Entwicklung nanoskaliger Pulver für den Einsatz in Treibmitteln und Sprengstoffen, wodurch sich Energieausbeute und Explosionsgeschwindigkeit erhöhen lassen.

Nanotechnologische Entwicklungen werden vermutlich erhebliche Auswirkungen für das militärischen Personal haben, unter anderem auf der Ebene der persönlichen Ausstattung (Stichwort: „Soldier as a System"). Im Vordergrund steht das Bestreben, Soldaten mit zusätzlichen Funktionalitäten auszustatten, ohne das Gewicht der Ausrüstung wesentlich zu erhöhen.

V. Vertiefungsthema: Anwendungen der Nanotechnologie in ausgewählten Industriebranchen

Angesichts des ausgeprägten Querschnittscharakters der Nanotechnologie dürfte es kaum einen Industriezweig geben, der zukünftig nicht durch nanotechnologiebasierte Innovationen beeinflusst wird. Die im Folgenden – in unterschiedlicher Tiefe – behandelten sechs Branchen repräsentieren daher nur einen – allerdings bedeutsamen – Ausschnitt des zukünftigen industriellen Gesamtpotenzials der Nanotechnologie.

Den Schwerpunkt der Analyse bildet eine vertiefte Darstellung der nanotechnologiebasierten Anwendungsoptionen in der Automobilindustrie, d. h. der Branche, in der Deutschland derzeit noch als international führend anzusehen ist. Schon aus diesem Grund dürften die durch Nanotechnologie verursachten Auswirkungen auch beträchtlichen Einfluss auf die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands haben.

Das mögliche Einsatzspektrum der Nanotechnologie im Bereich der Luft- und Raumfahrt ist ähnlich breit angelegt wie im Automobilbau. Jedoch stellt diese Hightechbranche aufgrund der besonderen Einsatzbedingungen häufig extreme Anforderungen an die technologische Leistungsfähigkeit der Komponenten, denen sich häufig sogar Kostengesichtspunkte unterzuordnen haben.

Im Gegensatz hierzu handelt es sich beim Bauwesen und bei der Textilindustrie eher um zwei Lowtechbranchen, die zwar über eine große Tradition verfügen, aber heute mit enormen Überlebensproblemen zu kämpfen haben. Aufgrund der umgesetzten Produktmengen dürfte hier jede auf Nanotechnologie basierende marktfähige Innovation große wirtschaftliche Auswirkungen haben.

Die meisten Implikationen der Nanotechnologie für die Energiewirtschaft sind unmittelbar mit einer Reihe von Optionen verknüpft, die bereits in Kapitel IV diskutiert wurden, wie Photovoltaik, Brennstoffzellen und Batterien. Daher kann die Branchenanalyse hier sehr kurz gehalten werden. Das gilt auch für die Chemische Industrie. Sie ist aus zwei Gründen eng mit der Entwicklung der Nanotechnologie verknüpft: Zum einen liefert sie die wesentlichen Grundstoffe für viele Produktoptionen, zum anderen werden viele chemische Produktionsprozesse zukünftig durch nanotechnologiebasierte verfahrenstechnische Innovationen beeinflusst werden.

Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren auf einem Gutachten des Fraunhofer-Instituts für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (FhG-INT 2003).

1. Automobilindustrie

Die Automobilindustrie gilt als der Motor der deutschen Volkswirtschaft schlechthin. Im Jahr 2001 wurden dort mehr als 17 % des industriellen Gesamtumsatzes erzielt und jeder achte in der Industrie Beschäftigte arbeitete in diesem Bereich. Außerdem entfiel 2001 ein Fünftel der gesamten Industrieinvestitionen in Deutschland auf die Automobilbranche. Auch im internationalen Rahmen ist eine steigende Bedeutung des Automobils festzustellen.

Hinzu kommt, dass die Automobilindustrie eine hightechorientierte Branche ist, die Spitzentechnologien relativ schnell auch einem breiten Kundenkreis zugänglich macht und, um wirtschaftlich bestehen zu können, machen muss. Daraus erklärt sich, dass gerade hier dem Bereich Forschung und Entwicklung besondere Anstrengungen gelten. Diese sind Voraussetzung sowohl für den Erfolg am Markt als auch dafür, die wachsenden sicher-

heitstechnischen, umweltpolitischen und wirtschaftlichen Anforderungen an das Automobil zu erfüllen. Mit über 14 Mrd. Euro erreichten die FuE-Aufwendungen der deutschen Automobilindustrie im Jahr 2001 knapp ein Drittel der gesamten FuE-Aufwendungen der deutschen Wirtschaft. Auf dieser Basis zählt die Automobilbranche zu den innovativsten Industriezweigen in Deutschland. Ein Indiz dafür ist auch die hohe Zahl von ungefähr 3 000 Patenten, die aus dem Automobilsektor pro Jahr angemeldet werden. Damit liegt Deutschland im Bereich von etwa einem Drittel aller weltweiten Patente auf diesem Sektor und nach wie vor deutlich vor allen anderen Staaten der Welt (VDA 2002).

Diese Dominanz sowohl in wirtschaftlicher und gesellschaftlicher als auch in technischer Hinsicht macht das Automobil zu einem besonders interessanten Untersuchungsobjekt im Hinblick auf die Entwicklung und Durchsetzung einer neuen Hochtechnologie wie der Nanotechnik.

Heute reicht das Spektrum nanotechnologischer Innovationsbemühungen im Automobilbau von bereits eingesetzten Komponenten oder Teilsystemen (z. B. reflexionsfreie Instrumentenbeschichtungen) über konkrete Entwicklungsaktivitäten (z. B. beschlagfreie Scheiben) bis hin zu visionären Produktideen mit einer allenfalls langfristigen Realisierbarkeit (z. B. sich selbst gestaltende Karosserien). Insgesamt erhofft man sich von der Nanotechnologie Verbesserungen im Hinblick auf alle für die weitere Entwicklung des Automobils relevanten Kriterien, von der Ökologie über die Sicherheit bis hin zum Komfort. Dabei ist teilweise bereits kurz- oder mittelfristig mit Fortschritten zu rechnen.

Zum Teil sind damit grundlegende neue Entwicklungen mit weit reichenden Auswirkungen auf das Produkt verbunden, zum Teil handelt es sich um Weiterentwicklungen in Teilbereichen, die, wenn überhaupt, nur zu marginalen Änderungen im Nutzwert des Automobils führen werden. Eine Bewertung der sich bietenden Möglichkeiten aus übergeordneter Sicht führt zu dem Ergebnis, dass nanotechnologische Kompetenz im Automobilbau der Zukunft zu den Kernfähigkeiten gehören wird, die zum Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit unbedingt erforderlich sind.

In der Diskussion um die erforderlichen Beiträge des Verkehrssystems zu einer nachhaltigen Entwicklung spielen ökologische Aspekte eine grundlegende Rolle, gerade auch mit Blick auf die im internationalen Maßstab zu erwartende wesentliche Steigerung der Verkehrsdichte und die damit verbundene Verschärfung der Probleme des Schadstoffausstoßes. Es zeigt sich, dass es bezüglich aller für den Kraftstoffverbrauch relevanten Kriterien Verbesserungspotenziale durch innovative nanotechnologische Entwicklungen gibt.

Gestützt werden die nanotechnologischen Entwicklungen im Automobilbau durch die ausgeprägte Querschnittlichkeit sowohl der Technik selbst als auch des Anwendungsgebietes. Auf nanostrukturierten Materialien basierende Entwicklungen gibt es z. B. auch im Maschinenbau, in der Chemie, der Elektronik oder der Energietechnik. Alle diese Technikfelder wiederum finden sich im Automobilbau wieder. Damit verbunden ist die Erwartung ausgeprägter Spin-off-Effekte, insbesondere auch von der Leadindustrie Automobilbau in andere Branchen hinein.

Insgesamt gibt es eine Vielzahl von Einzelvorschlägen zur Realisierung technischer Innovationen im Automobilbau auf der Grundlage nanotechnologiebasierter neuer Materialien. Die tiefer gehende inhaltliche Beschäftigung mit diesem Thema bedarf einer sinnvollen Einteilung des Gesamtgebietes. Hier bietet sich zunächst eine tabellarische Sortierung nach Einsatzmöglichkeiten in einzelnen Komponentengruppen oder Subsystemen des Automobils an (Kapitel V.1.1). Für die detaillierte Beschreibung ist eine Zusammenfassung der Einzeltechnologien zu bestimmten Anwendungsschwerpunkten sinnvoll (Kapitel V.1.2 bis V.1.4).

1.1 Nanotechnologiebasierte Automobil-Komponenten und -Subsysteme

Die in dieser Untersuchung gewählte Gliederung der Subsysteme des Automobils ist unterteilt in die Einzelsektoren Fahrwerk, Triebwerk/Antrieb, Karosserie und Ausrüstung/Ausstattung. Tabelle 10, S. 68, zeigt beispielhaft einige der wesentlichen Unterkategorien dieser Hauptbereiche.

Eine stichwortartige Zuordnung der einzelnen in der Literatur im Zusammenhang mit der technischen Ausstattung des Automobils genannten nanotechnologiebasierten Materialien zu den nach dieser Untergliederung sortierten Subsystembereichen gibt Tabelle 11, S. 68.

Tabelle 10

Subsysteme des Automobils

Fahrwerk	Triebwerk/Antrieb	Karosserie	Ausrüstung/Ausstattung
Räder, Achsen mit Radaufhängungen, Federung, Bremssystem, Lenksystem, Chassis	Motor, Einspritzsystem, Motorsteuerung, Abgasanlage, Treibstoffsystem, Starter/Lichtmaschine, Batterie, Kupplung, Getriebe, Gelenkwelle, Ausgleichsgetriebe, Antriebswellen	tragende Struktur, Scheiben, Türen/Klappen, Ausbauteile	Sicherheitsausstattung, Beleuchtung, Antennen, Spiegel, Lackierung, Schließsystem, Klimatisierung/ Belüftung, Audio-/Navigationssystem, Kommunikationssystem, Bedienungselektronik/ -elektrik, Displays/Anzeigen, Sitze, Innenraumverkleidung

Quelle: FhG-INT 2003

Tabelle 11

Zuordnung nanotechnologischer Anwendungen zu Subsystemen bzw. Komponenten

Subsystem	Komponenten (beispielhaft)	nanotechnologische Anwendung	technischer Reifegrad
Fahrwerk	Felgen, Achsen mit Radaufhängungen	hochfeste und gleichzeitig sehr gut verformbare leichte Stähle	Erprobungsphase
	Lagerelemente in Achsen mit Radaufhängungen	abriebfeste bzw. verschleißschützende Schichten mit maßgeschneiderten tribologischen Eigenschaften	Entwicklungsphase (teilweise ist derzeit noch der Preis problematisch)
	Reifen	Nanopartikel als Füllstoff in Gummimischungen (Verbesserung von Haftung, Verschleiß und Lebensdauer)	etabliert, werden weiterentwickelt
	Produktionstechnik Reifen	Nanopartikel auf den Innenwänden von Reifenformen (bessere Ablösbarkeit des Reifens aus der Form)	Zukunft
	Radaufhängung	Nanofluide in Vibrationsdämpfern	in Stoßdämpfern bereits realisiert
Triebwerk/Antrieb	bewegte Motorteile (Kurbel- oder Nockenwelle), Verteilereinspritzpumpen	abriebfeste bzw. verschleißschützende Schichten mit maßgeschneiderten tribologischen Eigenschaften	Entwicklungsphase (teilweise ist derzeit noch der Preis problematisch)
	Motoraufhängung	Nanofluide in Vibrationsdämpfern	Zukunft

noch Tabelle 11

Subsystem	Komponenten (beispielhaft)	nanotechnologische Anwendung	technischer Reifegrad
noch: Triebwerk/Antrieb	Motor	katalytische Beschichtung der Zylinderwände	Forschungsstadium
	Motor	Einspritzsysteme mit feinsten Löchern (Nanojets)	Forschungsstadium
	Motor	Nanospitzen für Feldemissionsschalter in Zündanlagen	werden bereits hergestellt
	verschiedene Aggregate	thermoelektrische Elemente zur Nutzung der Abwärme	Zukunft
	Treibstoffsystem	katalytische Nanopartikel als Zusatz im Kraftstoff	Forschungsstadium
	Kühlflüssigkeiten	Zusatz von Kupfer-Nanopartikeln oder Kohlenstoffnanoröhren (zur Erhöhung der Wärmeleitung und -kapazität)	Forschungsstadium
	Schmiermittel	Verschleißreduzierung z. B. durch Zusatz von Kupfernanopartikeln	etabliert, Weiterentwicklung
	Glühkerzen Dieselmotor	Erhöhung der Haltbarkeit durch Verwendung sibasierter nicht oxidischer Keramik	Prototypenstadium
	Abgasanlage Dieselfahrzeuge	elektrostatische Filter zur Abgasreinigung	Verbesserungspotenzial
	Abgasanlage	katalytische Nanopartikel in Katalysatoren	bereits seit Jahrzehnten praktiziert, werden weiterentwickelt
	Abgasanlage	nanoporöse Filter gegen Partikelemission	Zukunft
	Kraftstofftank	nanopartikelverstärkte Polymere/Nanofüllstoffe in Polymeren (Reduktion der Kohlenwasserstoffemissionen)	Zukunft
	elektr. Antrieb	Brennstoffzellen-Komponenten (Katalysatoren, Membranen, Wasserstoffspeicher, Reformer)	Entwicklungsstadium
	elektr. Antrieb	nanotechnologisch verbesserte Batterien oder Kondensatoren	Forschungsstadium
Karosserie	tragende Struktur, Türen/Klappen	hochfeste und sehr gut verformbare Stähle	Erprobungsphase
	tragende Struktur, Türen/Klappen	nanopartikelverstärkte Metalle (zur Gewichtseinsparung)	Entwicklungsphase

noch Tabelle 11

Subsystem	Komponenten (beispielhaft)	nanotechnologische Anwendung	technischer Reifegrad
noch: Karosserie	tragende Struktur	leichte Verbundwerkstoffe mit Nanoröhren	Zukunft
	Ausbauteile oder Abdeckhauben oder Elektrogehäuse	nanopartikelverstärkte Polymere (Leichtbau)	zum Teil bereits realisiert
	äußere Struktur	transparente Leichtbauwerkstoffe	langfristig
	äußere Struktur	adaptive Materialien (zur Beeinflussung der Umströmung des Fahrzeuges)	allenfalls langfristig
	äußere Struktur	adaptive Materialien (sich selbst gestaltende Karosserie)	allenfalls sehr langfristig
	Struktur insgesamt	Antikorrosionsschichten (anorganisch/organische Hybridschichten)	Zukunft
	Struktur insgesamt	nanotechnologisch modifizierte Klebetechniken und Haftvermittler	realistisch bzw. in Entwicklung
	Scheiben	beschichtete Kunststoffe	realisiert
	Scheiben	IR-reflektierende Schichten	realisiert
	Scheiben	Antireflexbeschichtungen	realisiert
	Scheiben	heizbare Frontscheiben (durch großflächige Nanoschichten)	realisiert
	Scheiben	hydrophile Oberflächenschichten (als Antibeschlagschichten)	Entwicklung
	Scheiben	hydrophobe Oberflächenschichten (als wasser- bzw. schmutzabweisende Schichten)	Forschung
	Scheiben	Oberflächen mit gesteuert (regenerativen) hydrophilen/hydrophoben Eigenschaften	allenfalls langfristig
	Scheiben	elektrochrome Schichten (für gesteuerte Abdunkelung)	Forschung
Ausrüstung/Ausstattung	Spiegel	elektrochrome Schichten (für gesteuerte Abdunkelung)	realisiert
	Spiegel oder Instrumententafeln/Displays	Antireflexbeschichtungen	realisiert

Subsystem	Komponenten (beispielhaft)	nanotechnologische Anwendung	technischer Reifegrad
noch: Ausrüstung/Ausstattung	Scheinwerfer-abdeckscheiben	hydrophile Oberflächen-schichten (als Anti-beschlagschichten)	Zukunft
	Scheinwerfer	Scheinwerferreflektor-beschichtungen	realisiert
	Lackierung	mit verbesserter Kratzfes-tigkeit, Beständigkeit	es gibt erste Entwicklungen
	Lackierung	mit verbesserter Farbbril-lanz bzw. -wirkung	zum Teil realisiert
	Lackierung	hydrophobe Ober-flächenschichten (als was-ser- bzw. schmutzabwei-sende Schichten)	Zukunft
	Lackierung	Zusatz von Kohlenstoff-nanoröhren zur Verbesse-rung elektrostatischer Eigenschaften (Vorteile beim Aufbringen der Lackierung)	Zukunft
	Lackierung	mit schaltbaren Farben	allenfalls langfristig
	Lackierung	mit Selbstheilungseffekt (z. B. durch Selbstorganisa-tion)	allenfalls langfristig
	Glas- oder Kunststoffober-flächen	ohne Oberflächenverschleiß verschiebbare, aber trotz-dem gut haftende Folien (z. B. für variablen Sonnen-schutz)	Zukunft
	Autodächer oder gesamte Fahrzeugstruktur	Dünnschichtsolarzellen oder organische Zellen (z. B. zur Versorgung von Klimaanlagen)	auf Dächern gibt es erste Realisierungen (auf gesam-ter Struktur langfristig)
	Klimaanlage	antibakteriell wirksame Wärmetauscher	Zukunft
	elektrische Grundversor-gung des Fahrzeugs	nanotechnologisch verbes-serte Batterien oder Kondensatoren	Zukunft
	Sitze, gesamter Innenraum	nanostrukturierte Textilien (hydrophil oder hydrophob)	Zukunft
	Innenraumverkleidung	nanopartikelverstärkte Polymere (Leichtbau)	zum Teil bereits realisiert
	gesamter Innenraum	nanotechnologisch modifi-zierte Klebetechniken und Haftvermittler	realistisch bzw. in Entwick-lung

Quelle: FhG-INT 2003

1.2 Nanobasierte Konstruktionswerkstoffe

Das wichtigste übergreifende Ziel bei der Entwicklung neuer Automobile ist die Erhöhung der Energieeffizienz und damit die Einsparung von Kraftstoff und die Reduzierung der Abgasemissionen. Im Bereich der Konstruktionswerkstoffe richten sich die wesentlichen diesbezüglichen Bemühungen auf die Verringerung der Gewichte und der Reibungsverluste.

Nanopartikelverstärkte Polymere werden bereits vereinzelt eingesetzt. Sie versprechen ein großes Potenzial als Konstruktionswerkstoffe. Der Schwerpunkt der Bemühungen liegt dabei auf der möglichst kostengünstigen Herstellung nicht agglomerierender Nanopulver. Anwendungsmöglichkeiten gibt es überall, wo bisher konventionelle Kunststoffe eingesetzt werden. Hierzu zählen z. B. Teile der Innenausstattung, Abdeckungen im Motorraum und Gehäuse von Elektrobauteilen. Aber auch an die Substitution ganzer Baugruppen aus metallischen Werkstoffen wird gedacht. Kraftstofftanks aus nanopartikelverstärkten Polymeren können zur Minimierung der Kraftstoffemissionen beitragen. Hier wird der Diffusionsweg der Kraftstoffmoleküle erheblich vergrößert, da sie um eingelagerte plättchenförmige Nanosilikate herum diffundieren müssen (Hohenberger 2000; König 2002; VDI 2002).

Die Nutzung von Rußpartikeln als Füllstoffe in Autoreifen ist heute Stand der Technik. Erst dadurch erhalten die Reifen die gewohnten Eigenschaften und dabei vor allem ihre gute Haltbarkeit. Durch die Einführung nanoskaliger Ruße lassen sich diese Eigenschaften weiter verbessern. Die großen Oberflächen der Nanostrukturruße führen zu erhöhten Wechselwirkungen mit den Kautschuken und damit zu einer Erhöhung des Verstärkungseffektes im Reifen. Das führt im Betrieb zu einer Reduzierung des Rollwiderstandes und zu einer Erhöhung der Haltbarkeit. Diese beiden Eigenschaftsverbesserungen gelingen unter Beibehaltung des guten Verhaltens der Reifen auf nassen Straßen. Eine weitere Verbesserung des Bremsverhaltens bei Nässe ist durch Zusatz nanoskaliger Kieselsäuren in der Lauffläche zu erreichen, der inzwischen ebenfalls zum Stand der Technik gehört (Freund/Niedermeier 1999; Rügheimer/Schiller 2002; Vilgis/Heinrich 2001; Vollrath 2002).

Auch die Eigenschaften von Metallen lassen sich durch das Einbringen nanoskaliger Phasen verbessern. Das kann durch Nanophasensegregation während einer Wärmebehandlung geschehen. So entstehen z. B. Stähle mit besonders hohen Festigkeiten bei gleichzeitig sehr guter Warmumformbarkeit. Derartige im Karosserieleichtbau einsetzbare Werkstoffe werden vom japanischen Stahlhersteller NKK entwickelt und befinden sich heute in der Erprobungsphase (Materials World 2001).

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Metallen soll in Zukunft durch das direkte Einbringen von nanoskaligen Teilchen aus anderen Materialien, v. a. Keramiken, z. B. in die metallischen Schmelzen erreichbar sein. In so erhaltenen nanopartikelverstärkten Metallen ist das Durchlaufen von Rissen bzw. Versetzungen erschwert. Sie sind daher bruchfester und resistenter gegenüber thermischen Wechselbeanspruchungen. Das Versetzen von Aluminium mit oxidischen Nanopartikeln beispielsweise verdoppelt die Zugfestigkeit gegenüber konventionellen Al-Mg-Si-Legierungen. Damit sind an gleicher Stelle dünnere Metallteile einsetzbar, wodurch ein weiterer wesentlicher Beitrag zum Leichtbau geleistet werden kann (König 2002; VDI 2002).

Durch die Einbeziehung solcher nanopartikelverstärkter Metalle in Beschichtungssysteme verspricht man sich wesentliche Fortschritte im Verschleißschutz von Bauteiloberflächen. Ein wichtiger Aspekt ist die deutliche Erhöhung der Beanspruchbarkeit von Oberflächen insbesondere in Motoren, Getrieben oder Turboladern. Hier sind wesentlich längere Standzeiten der Aggregate zu erwarten. Diese Entwicklung kann langfristig bis hin zu vollkommen schmierstofffreien Systemen führen (ölfreier Motor). Konkrete Bemühungen gibt es heute z. B. um die Nutzbarmachung von Multischichten aus Nitriden für den Schutz hochbelasteter Teile in Verteilereinspritzpumpen und Pumpe-Düse-Einheiten von Dieselmotoren. Hier strapazieren Temperaturen von bis zu 250 °C und Drücke von bis zu ca. 2 200 bar das Material. Entwickelt werden kostengünstig und effizient herzustellende Multischichten, die aus mehreren jeweils nur wenige nanometerdicken Lagen aus amorphem Siliziumnitrid bestehen, in welche nanokristalline Titannitrid-Körner eingebettet sind. Bereits eingesetzt werden nanodispersionsgehärtete Chromschichten im Bereich des Ventiltriebes von Dieselmotoren. Hier werden Reibungsverluste und Verschleiß schon heute signifikant reduziert (König 2002; König et al. 2001; Langenfeld 2002; Reinhold 2001; Repenning 1999; Von der Weiden 2002).

Von besonderer Bedeutung für die Funktionserhaltung der für Konstruktionszwecke eingesetzten Werkstoffe sind die Maßnahmen zum Korrosionsschutz. Auch hier spielen Beschichtungssysteme eine wichtige Rolle. Eine wesentliche nanotechnologische Entwicklung in diesem Bereich wären praktikable Verfahren zur Applikation von anorganisch-organischen Hybridschichten. Diese würden die Flexibilität organischer Beschichtungen mit der Diffusionssperrwirkung bestimmter anorganischer Materialien kombinieren und chemisch mit dem Grundmaterial verbindbar sein. Damit wäre der Ersatz herkömmlicher, schwermetallhaltiger Korrosionsschutzsysteme möglich.

Von besonderer Bedeutung im Konstruktionsbereich sind auch nanotechnologisch modifizierte Klebetechniken und Haftvermittler. Mit diesen lassen sich Energie bei den Fügeprozessen sparen (Kleben statt Schweißen), umweltbelastende Klebemittel ersetzen und Recyclingprozesse vereinfachen. Eine interessante Anwendung könnte sich durch Klebstoffe ergeben, die mit magnetischen Nanopartikeln modifiziert sind. Die Hafteigenschaften dieser Klebstoffe können von außen durch elektromagnetische Strahlung gesteuert werden, indem die auf diese Weise eingekoppelte thermische Energie chemische Reaktionen oder ein thermisches Aufschmelzen bewirkt. Derartige

Anwendungen werden von der Firma Sustech GmbH in Darmstadt entwickelt (VDI/FhG-INT 2002).

Visionäre Konzepte zur Nutzung der Nanotechnologie für den strukturellen Leichtbau insbesondere von Karosserie und Fahrwerk beinhalten z. B. die Nutzung von Nanoröhren als Teil von Verbundwerkstoffen. Man erhofft sich Verbunde mit erheblicher mechanischer Festigkeit, bei deutlich kleinerem spezifischen Gewicht im Vergleich zu Stahl (König 2002; König et al. 2001).

Weit reichende Auswirkungen für den Fahrzeugbau sind auch von neuen großflächigen Verscheibungskonzepten zu erwarten. Hier geht es um die Entwicklung transparenter Leichtbauwerkstoffe mit geringer Dichte, hoher Steifigkeit und Schlagzähigkeit. Neben einer verbesserten Rundumsicht durch Verzicht auf A-, B- und C-Säule hätte dieser visionäre Ansatz auch Vorteile bezüglich des Karosserieleichtbaus.

Weniger visionär als derartige Konzepte sind Überlegungen, die konventionellen Autoscheiben durch im Nanometerbereich beschichtete Kunststoffe zu ersetzen. Entsprechende Beschichtungen werden bereits seit einiger Zeit bei Kunststoffbrillengläsern eingesetzt. Sie verleihen z. B. Polycarbonaten die Gebrauchseigenschaften und insbesondere die Kratzfestigkeit von Mineralglas. Dadurch wird der Einsatz als Automobilverglasung möglich. Diese Entwicklung hat u. a. zur Gründung eines Joint Venture zwischen der Bayer AG und General Electric, der Exatec GmbH, geführt, welches das Ziel hat, in den nächsten Jahren auf breiter Basis kratzfest beschichtete Kunststoffe im Automobilsichtbereich einzuführen.

Dabei spielt nicht nur der Schutz vor mechanischem Abrieb, sondern auch der Schutz vor vergilbenden UV-Strahlen eine wichtige Rolle, um die Funktionalität über die Lebensdauer eines Fahrzeugs garantieren zu können. Dazu können sowohl gängige organische UV-Absorber als auch anorganische Nanopartikel wie Ceroxid oder Titandioxid in die Schicht integriert werden (Jonschker 2001; König 2002; VDI 2002).

1.3 Nanobasierte Werkstoffe für Antriebe und Energieversorgung

Eine Vielzahl von Entwicklungsbemühungen und Konzeptvorschlägen zur Nutzbarmachung von Nanotechnologien im Automobil betrifft den Bereich Energieversorgung/Antrieb. Die Überlegungen reichen hier von der Verbesserung konventioneller Komponenten, z. B. im Bereich nanotechnologisch optimierter Batterien und Kondensatoren oder optimierter Schmiermittel (z. B. durch Zusatz von Kupfer-Nanopartikeln zum Motoröl), bis hin zur großflächigen Bedeckung des Fahrzeugs mit Solarzellen oder zur Nutzung vollelektrischer Antriebe auf Basis der Brennstoffzellentechnologie.

Ein möglicher Weg, zusätzliche Energie nutzbar zu machen, ist der Einsatz von thermoelektrischen Wandlern. Diese könnte man an heißen Modulen wie Zylinder im Motor oder an der Abgasanlage einschließlich des Katalysators anbringen, um zumindest einige Prozent der bisher verschwendeten thermischen Energie zu gewinnen. Konkrete Überlegungen in diesem Zusammenhang gehen vom Einsatz nanokristalliner Schichten aus Halbleitern mit niedrigen Bandabständen wie InGaAs, GaSb oder SiGe aus. In diesen kommt es zu einer ausgeprägten thermoelektrischen Umwandlung, abhängig von der jeweiligen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit und basierend auf dem Seebeck-Effekt. Besonders hohe Umwandlungseffektivitäten konnten in letzter Zeit mit nanoskaligen Schichtsystemen aus Bi_2Te_3 und Sb_2Te_3 erreicht werden (König 2002; VDI 2002; Venkatasubramanian 2002).

Die wesentliche Technik zur Verminderung des Schadstoffausstoßes ist der Katalysator im Abgasstrom. Seine Wirkung beruht bereits seit seiner Einführung wesentlich auf dem Einsatz nanoskaliger Edelmetallpartikel. Jedoch gibt es auch hier neue Entwicklungen, insbesondere durch die zunehmende Bandbreite, in der man entsprechende Strukturen gezielt und kostengünstig herstellen kann. Darüber hinaus denkt man darüber nach, dem Kraftstoff direkt katalytische Nanopartikel zuzusetzen, damit bei der Verbrennung gar nicht so viele Schadstoffe entstehen. Einen ähnlichen Effekt könnte möglicherweise eine katalytisch wirksame Nanobeschichtung der Zylinderwände im Motor haben (Vollrath 2002).

Eine ebenfalls direkt im Motor wirksame Technologie zur Schadstoffminimierung wäre die Erzeugung so genannter Nanojets durch spezielle Düsensysteme im Bereich der Kraftstoffeinspritzung. Bei den hier diskutierten Abmessungen sind nicht mehr die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Hydrodynamik wirksam. Sie werden abgelöst durch eine Molekulardynamik. Dadurch soll eine homogene und großflächige Zerstäubung des Kraftstoffes und damit die Optimierung des Verbrennungsvorganges erreicht werden (König 2002).

Weitere Anwendungen in diesem Bereich sind Nanospitzen für Feldemissionsschalter in Zündanlagen. So werden bereits piezokeramische Nanospitzen hergestellt, die mechanische Bewegungen wesentlich effizienter in elektrische Energie umwandeln als mikrostrukturierte Piezokeramiken. Dadurch wird eine hohe Frequenz von Zündfunken und damit eine effizientere Kraftstoffnutzung möglich. Diese Technologie führt letztendlich ebenfalls zu einer Reduktion der Abgasemissionen (VDI/FhG-INT 2002).

Eine weitere anvisierte Technologie zur Schadstoffminderung sind nanoporöse Filtersysteme zur Minimierung der Emission von Partikeln im Nanometerbereich, die sowohl im Otto- als auch vor allem im Dieselmotor entstehen und denen ein kanzerogenes Potenzial zugesprochen wird. Die geeigneten Nanoporen können z. B. durch Ätzverfahren hergestellt werden. Ihre Wirkung beruht auf der rein mechanischen Absperrung des Durchgangs für Partikel oberhalb einer bestimmten Größe und/oder der katalytischen Umwandlung derselben an den entsprechend beschichteten Innenseiten der Poren. Die Nanotechnologie bietet darüber hinaus die Möglichkeit, effektivere elektrostatische Filter zur Abgasreinigung in Dieselfahrzeugen zu realisieren (König 2002).

Wesentliche Bedeutung für den Kraftstoffverbrauch eines Autos hat seine aerodynamische Gestaltung. Hier könnten nanotechnologische Komponenten sowohl in der Sensorik als auch in der Aktorik eine feinfühlige Anpassung der Umströmung des Fahrzeuges an die jeweilige Fahrsituation ermöglichen. Derartige Verfahren würden auch zu einer deutlichen Reduktion der Fahrgeräusche beitragen und als miniaturisierte elektronische Spoiler eine adaptive Fahrdynamikregelung erlauben. Technisch haben die hier angedachten Möglichkeiten Ähnlichkeit mit dem aus der Natur bekannten Haihauteffekt. Für die Sensorik ist dabei z. B. an hochempfindliche Nano-Silizid-Systeme und für die Aktorik an so genannte Nanomuskeln aus Kohlenstoffnanoröhren gedacht. In utopischen Konzeptvorschlägen werden letztere sogar für eine adaptive Karosserie vorgeschlagen, deren Form sich auch makroskopisch je nach Fahrsituation oder Kundenwunsch umgestalten lässt (König 2002; König et al. 2001).

Bereits heute sind mit Solarzellen bestückte Schiebedächer als Sonderausstattung für Fahrzeuge verschiedener Hersteller bestellbar. Sie dienen im Wesentlichen zur aktiven Belüftung während des Parkens, z. B. wenn das Auto in der prallen Sonne steht. Eine Nutzung des Dachbereichs könnte weitere Anwendungen eröffnen, z. B. die Notstromversorgung nach einem Unfall. Bei Beschichtung ganzer LKW-Dächer sind Leistungen im Kilowattbereich und damit die Einspeisung überschüssiger Energie in das Batteriesystem denkbar. In diesem Zusammenhang wird natürlich eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrades der einsetzbaren Dünnschichtsolarzellen angestrebt. Hier könnte die Nanotechnologie erhebliche Beiträge leisten, z. B. durch das gezielte Einbringen so genannter Germanium-Nanodots in eine Siliziumschicht oder durch das Aufbringen ultradünner Antireflexionsbeschichtungen.

Eine entscheidende Steigerung solar erzeugbarer Leistung wäre erreichbar, wenn die gesamte Karosserieoberfläche zur Energieversorgung durch Sonnenlicht nutzbar wäre. In derartigen Konzepten spielen Farbstoffsolarzellen eine grundlegende Rolle. Dabei werden Farbstoffmoleküle und nanoporöse Titandioxidpartikel mit einem Elektrolyten gemischt und zusammen mit geeigneten Elektroden in die Außenhaut integriert. Die Stromerzeugung ist nur wenig vom Einfallswinkel des Sonnenlichtes abhängig. Farbstoffsolarzellen befinden sich heute im Stadium von Forschung und Entwicklung. Ein Einsatz im Automobilbau ist eher langfristig denkbar (König 2002; König et al. 2001).

In verschiedenen, teilweise bereits sehr weit fortgeschrittenen Projekten zur Energieversorgung einzelner Hilfsaggregate oder sogar des gesamten (dann vollelektrischen) Antriebs spielen Brennstoffzellen die entscheidende Rolle. Diese gehören damit zu den wichtigsten Zukunftsoptionen im Hinblick auf eine umweltfreundliche und nachhaltige Mobilität. Ihre allgemeine, vom Auto zum Teil unabhängige technische Weiterentwicklung wird in den verschiedensten Einzelbereichen durch Fortschritte bei Nanotechnologien gefördert.

Je nach Typ des Brennstoffzellensystems wird ein vorgeschalteter Reformer zur Herstellung von Wasserstoff aus einer fossilen Ausgangssubstanz benötigt. Hier liegen Anwendungsmöglichkeiten für die Nanotechnologie im Bereich der Einspritzung der Wasserstoffträgersubstanz und im Bereich des Katalysators für die Umwandlungsreaktion. Im Bereich der Einspritzung lägen die Vorteile der Nanometerabmessungen in der Erreichbarkeit eines sehr fein verteilten und damit hochreaktiven Tröpfchen-Strahls. Die Wirksamkeit des Katalysators lässt sich durch die Erhöhung der inneren Oberflächen vergrößern. Die hier vorgesehenen Nanoporen sind z. B. mit der Technologie des Selbstorganisierten Ätzens herstellbar.

Wenn man auf den Reformer verzichten will, dann braucht das System eine Komponente zur Speicherung des benötigten Wasserstoffs. Mit einer prognostizierten Speicherfähigkeit von mehr als 10 Gew.-% H_2 galten hier Kohlenstoff-Nanotubes lange Zeit als das aussichtsreichste Material, das ein Zehntel des Bedarfs an Tankvolumen heutiger Drucktanks versprach. Ausführliche Testreihen mit diesem Werkstoff führten aber lediglich zu erreichten Kapazitäten von um die 2 Gew-% H_2. Trotzdem wurde die Erforschung von Nanofasern zur Wasserstoffspeicherung nicht aufgegeben.

Auch in der Brennstoffzelle selbst sind entscheidende Verbesserungen durch die Nanotechnologien möglich. Hier geht es um die verschiedensten Maßnahmen, von der Vergrößerung reaktiver Oberflächen bis hin zur weiteren Minimierung benötigter Schichtdicken von Elektroden oder Membranen. Insgesamt sollen so eine Erhöhung des Wirkungsgrades sowie eine Verringerung des Brennstoffverbrauchs, der Emissionen und auch der Kosten von Brennstoffzellen erreicht werden (König 2002; König et al. 2001).

1.4 Nanobasierte funktionale Schichten auf kundenrelevanten Flächen

Die für den Nutzer offensichtlichsten Einsatzmöglichkeiten für Nanotechnologien liegen im Bereich der direkt wahrnehmbaren Oberflächen des Autos, von der Lackierung über die Verscheibung bis hin zum Cockpit. Hier gibt es eine Vielzahl von Ideen und zum Teil bereits verwirklichten Anwendungen.

Eine bereits seit längerem praktizierte Standardanwendung sind Scheinwerferreflektorbeschichtungen. Sowohl die hauchdünne Barrieregrundierung des Reflektors als auch die aufgedampfte Aluminiumreflexionsschicht und die Korrosionsschutzoberfläche sind nur einige Nanometer dick. Die wesentlichen Vorteile gegenüber konventionellen Beschichtungen liegen in einem höheren Reflexionsgrad und damit einer höheren Lichtbrillanz sowie in einer längeren Haltbarkeit (Rügheimer/Schiller 2002).

Auch im Bereich von Wärmeschutzverglasungen und beheizbaren Frontscheiben gibt es bereits Lösungen auf der Grundlage der Nanotechnologie. Sie basieren auf der Nutzung nanoskaliger Multilayerinterferenzbeschichtungen. Eine gleichzeitige Realisierung beider Effekte, also Wärmeschutz und Beheizbarkeit, gelingt durch das Auf-

bringen einer ultradünnen Beschichtung auf Silberbasis auf die Innenseite der äußeren Verbundglasscheibe. Diese reflektiert die einfallende Wärmestrahlung und gestattet gleichzeitig aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit eine flächige Beheizung der Scheibe ohne störende Heizdrähte. Vorteile sind eine verbesserte Sicht durch beschlag- und eisfreie Scheiben sowie ein erhöhter Klimakomfort für die Fahrzeuginsassen (Langenfeld 2002; Rügheimer/Schiller 2002).

Eine ebenfalls bereits realisierte Anwendung ist der Einsatz von Antireflexionsbeschichtungen auf Abdeckscheiben im Displaybereich. In der Fotoindustrie dienen ähnliche Systeme bereits seit Jahrzehnten zur Herstellung vergüteter Optiken. Allerdings waren für diese Anwendung immer vakuumgestützte Verfahren erforderlich. Dabei kann die Fertigung nur in kleinen Chargen in Bedampfungsanlagen stattfinden und ist relativ teuer. Für einfachere Anwendungen wie die Entspiegelung von Instrumentenabdeckungen im Automobil sind derartige Beschichtungsprozesse zu aufwendig. Deshalb ist hier viele Jahre lang nach Alternativen gesucht worden. Eine Lösung wird heute von der Firma Schott angeboten. Dabei kommen beidseitig im Tauchverfahren aufgebrachte interferenzoptische Sol-Gel-Schichten zum Einsatz. Diese haben Dicken im Nanometerbereich und bestehen im Wesentlichen aus Siliziumdioxid und Titandioxid. Sie können die Reflexion einer Scheibe von 8 auf 1 % verringern.

Es besteht ein großes Interesse daran, diese oder eine ähnliche Technologie auch für die Verringerung der Reflexionen an der Windschutzscheibe anzuwenden. Sollte dies gelingen, hätte man wesentlich größere Freiheiten beim Design und vor allem bei der Farbgestaltung des Innenraumes. Selbst ein ausgesprochen helles Armaturenbrett würde dann nicht mehr zu störenden Blendwirkungen an der Frontscheibe führen. Allerdings gibt es hier immer noch grundsätzliche Schwierigkeiten mit der Haltbarkeit der Schichten insbesondere an der Außenseite der Scheibe (Hedderich 2001; Langenfeld 2002; Rügheimer/Schiller 2002).

Ein weiteres interessantes Feld für Nanotechnologien sind elektrochrome Beschichtungen. Bereits verwirklicht sind derartige Systeme bei automatisch abblendenden Rückspiegeln. Sie basieren auf einem aufgedampften Schichtsystem aus Lithium, Cer und Wolframtrioxid. Eine sich ändernde Intensität des auftreffenden Lichtes wird über zwei Photozellen erfasst. Diese veranlassen eine Änderung der an das Schichtsystem angelegten elektrischen Spannung und damit eine Diffusion von Lithiumionen in die Wolframtrioxid-Schicht hinein oder aus ihr heraus. Eine dort ablaufende reversible chemische Reaktion bewirkt, dass der Spiegel abgedunkelt oder aufgehellt wird. Als besonderer Vorteil dieser Technologie ergibt sich eine Erhöhung der Fahrsicherheit aufgrund der stufenlosen und dabei automatisch, also ohne Ablenkung des Fahrers, ablaufenden Unterdrückung der störenden Blendreflexe.

Auch bei diesem Effekt ist man an einer Übertragung auf die Verscheibung des Fahrzeugs interessiert. Hier verspricht man sich davon eine Reduzierung der Sonneneinstrahlung und damit eine Verringerung der Innenraumerwärmung sowie einen je nach Fahrsituation anpassbaren allgemeinen Blend- und Sichtschutz. Probleme bei der weiteren Entwicklung dieser Technologie gibt es derzeit jedoch noch mit den zu langen Schaltzeiten des Systems, mit dem zu geringen erreichbaren Hub, also dem Unterschied zwischen ganz hell und ganz dunkel, sowie mit den zu hohen Kosten (Elektronik 2002; Langenfeld 2002; Rügheimer/Schiller 2002).

Wesentlichen Einfluss auf Fahrsicherheit und Komfort haben die Benetzungseigenschaften der Fahrzeugoberflächen gegenüber den allgegenwärtigen Wassermolekülen. Hydrophil beschichtete Oberflächen können für die Herstellung beschlagfreier Scheiben genutzt werden, die von Wasser ohne Tropfenbildung großflächig benetzt werden.

Die hydrophilen Eigenschaften entstehen hier durch Aufbringen einer chemisch modifizierten, einseitig polaren Nanoschicht. Dazu nutzt man eine gezielte Anbindung bzw. Einlagerung von Tensiden bzw. OH-Gruppen in den oberflächennahen Bereich des Beschichtungswerkstoffes. Anwendungsmöglichkeiten werden in der Beschichtung der Scheibeninnenseiten, der Außenspiegel oder der Scheinwerferabdeckscheiben gesehen. Neben der Steigerung des Komforts verspricht man sich dadurch eine wesentliche Verbesserung der Fahrsicherheit aufgrund der freien Sicht bzw. der besseren Ausleuchtung der Straße.

Im Bereich der beschlagfreien Scheiben gibt es eine Reihe von Entwicklungsaktivitäten und prototypischen Anwendungen. Eine Serienproduktion ist aber noch nicht in Sicht. Neben den hohen Kosten gibt es Probleme mit den Schichtdicken, die aufgrund des Entstehens optischer Interferenzfarben optimiert werden müssen. Außerdem verfügen derzeit herstellbare Schichten über zu geringe Abriebfestigkeiten und Härten. Auch andere Fragen der Langzeitwirksamkeit sind noch zu klären. Am ehesten ist wohl mit der Einsetzbarkeit auf den Innenseiten der Scheinwerferabdeckscheiben zu rechnen, da hier die mechanische Belastung der Oberfläche relativ gering ist (Langenfeld 2002; Langenfeld et al. 2001; Rügheimer/Schiller 2002).

Als Anwendung wasser- bzw. schmutzabweisender Beschichtungen im Automobilbau wird an eine hydrophobe Beschichtung der Außenspiegel oder der Außenseite der Windschutzscheibe gedacht, wo man möglicherweise ganz auf den Scheibenwischer verzichten und damit zu einer weiteren Gewichts- und Bauraumreduzierung beitragen möchte. Ob man jedoch auf den Scheibenwischer wirklich verzichten kann, ist zumindest umstritten. Probleme gibt es hier insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten, bei Sprühregen oder bei nassem Schnee.

Außerdem gibt es Überlegungen, auch die Lackoberflächen oder die Radfelgen hydrophob zu machen, um so durch Verringerung des Reinigungsaufwandes eine Komfortsteigerung zu erreichen.

Für die Herstellung hydrophober Beschichtungen stehen zahlreiche Prozesstechniken zur Verfügung. Sie können

z. B. durch Einreibe- oder Sprühverfahren appliziert werden. Von grundsätzlicher Bedeutung ist dabei die Erzeugung einseitig unpolarer Nanoschichten, die insbesondere durch fluorierte organische Verbindungen gebildet werden können. Solche Schichten sind heute hinsichtlich ihrer wasserabweisenden Eigenschaften erfolgreich getestet. Trotzdem ist vor einem verbreiteten Einsatz im Automobilbau noch eine Vielzahl von Fragen zu lösen. Die Probleme liegen ähnlich wie bei den hydrophilen Systemen, also insbesondere bei den Kosten sowie bei den mangelhaften mechanischen Eigenschaften und der Langzeitwirksamkeit. Auch die angedachte Fähigkeit zur Selbstausheilung bzw. Regeneration im Beschädigungsfall ist noch weit von einer technischen Realisierung entfernt.

Abhängig vom Wetter oder der konkreten Fahrsituation könnte es hilfreich sein, entweder eine hydrophile oder eine hydrophobe Oberfläche, z. B. auf der Windschutzscheibe, zu haben. Damit ist die Frage nach entsprechend schaltbaren Oberflächensystemen angesprochen. Für deren Realisierung gibt es heute aber nur erste Ansätze bzw. Ideen. Ihre Erforschung befindet sich noch in einer sehr frühen Phase (Langenfeld et al. 2001).

Das gezielte Einstellen der Benetzungseigenschaften ist auch für sämtliche im Innenraum des Fahrzeugs eingesetzten textilen Oberflächen von großem Interesse. Hier können nanostrukturierte Textilien den Klimakomfort verbessern, indem sie z. B. einen verbesserten Feuchtigkeitstransport vom Körper der Insassen weg ermöglichen. Auch eine verringerte Anschmutzbarkeit bzw. eine leichtere Schmutzlösbarkeit sind erreichbar. Hydrophobe nanostrukturierte Oberflächen spielen außerdem eine Rolle im Zusammenhang mit der Entwicklung antibakteriell wirksamer Wärmetauscher in Klimaanlagen (König et al. 2001).

Von besonderer Bedeutung für den Markterfolg eines Automobils ist seine äußere Erscheinung. Diese wird auch durch die Farbgebung, also die Lackierung, beeinflusst. Von Bedeutung für den Lackiervorgang könnte hier die Verbesserung der elektrostatischen Eigenschaften des flüssigen Lacks durch Zugabe geladener Kohlenstoffnanoröhren werden. Darüber hinaus eröffnet die Nanotechnologie gerade für die fertige Lackierung vielfältige Möglichkeiten zur Erzeugung verschiedener, auch ganz neuartiger Farbeffekte. Diese werden im Wesentlichen dadurch möglich, dass auch die Wellenlänge des Lichtes im Bereich von einigen hundert Nanometern liegt.

Im Vordergrund steht die Herstellung von Effektpigmenten. Diese bestehen aus kleinen Glimmerplättchen, die natürlich gewonnen und mechanisch aufbereitet werden. Inzwischen werden jedoch auch synthetisch hergestellte Plättchen aus Silizium- oder Aluminiumoxid verwendet. Diese werden mit dünnen, nur wenige nanometerdicken Schichten aus Metalloxiden, beispielsweise aus Titan- oder Eisenoxid, beschichtet. Mithilfe dieser Pigmente erhält man einen Perlglanzeffekt.

Dieser Effekt entsteht durch das Zusammenwirken von drei unterschiedlichen Wechselwirkungen des Lichtes mit den Pigmentoberflächen. Ein Teil des Lichtes wird direkt an der glatten Oberfläche des Pigments reflektiert, ein anderer Teil an den Phasengrenzen der plättchenförmigen Partikel vielfach reflektiert, sodass man einen Effekt der Tiefe erhält. Außerdem treten Interferenzen auf, wie sie an dünnen Schichten, deren Dicke im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes liegt, allgemein beobachtet werden. Diese geben der Farbe eine leicht opalisierende Wirkung. Mit Titanoxid beschichtete Glimmerplättchen, deren Farben durch die Dicke der Titanoxidschicht bestimmt werden, sind schon seit 30 Jahren im Einsatz.

Zur weiteren Erhöhung der Produktattraktivität ist es möglich, durch Einbringen so genannter Nanowhisker in den Lack richtungsabhängige Farbeffekte zu erzeugen. Außerdem denkt man daran, Automobillacke mit schaltbaren Farben zu entwickeln. Auch hier könnte die Nanotechnologie einen entscheidenden Beitrag liefern. Allerdings steht man dabei noch am Anfang der Überlegungen. Das Gleiche gilt für die Entwicklung selbstausheilender Lacke, die Kratzer oder Beschädigungen der Korrosionsschutzschicht selbstständig beseitigen sollen. Dabei könnten so genannte selbstorganisierende Nanostrukturen eine Rolle spielen, die Störungen des Systems gezielt durch Reorganisation beheben können (Hilarius 2002; König et al. 2001; Langenfeld 2002; Laser Magazin 3/2002; MINATECH Information Day 2001).

Erste prototypische Anwendungen gibt es dagegen bereits mit superkratzfesten Lacken, die vom Institut für Neue Materialien in Saarbrücken entwickelt worden sind. Diese basieren auf dem Einbringen von nanoskaligen Keramikpartikeln und haben nahezu die Kratzfestigkeit von mineralischem Glas. Außerdem lassen sie sich mit den üblichen Lackierverfahren verarbeiten. Ähnliche Entwicklungen der Firma Degussa basieren auf dem Zusatz nanoskaliger Kieselsäuren zum Lack (Bild der Wissenschaft 9/2002; Degussa o. J.).

2. Luft- und Raumfahrt

Nanotechnologiebasierte Materialien werden mittel- bis langfristig erhebliche Anwendungspotenziale in der Luft- und Raumfahrttechnik finden. Nanomaterialien könnten insbesondere dazu beitragen, die Kosten für den Betrieb von Luft- und Raumfahrtsystemen durch den Einsatz leichtgewichtiger, hochfester Strukturwerkstoffe und damit verbundene Gewichts- und Energieeinsparungen deutlich zu senken. Darüber hinaus wären eine Erhöhung der Funktionalität und Zuverlässigkeit von Luft- und Raumfahrtsystemen durch verbesserte Funktionsmaterialien, Sensoren und Instrumente sowie die Realisierung neuer Systemkonzeptionen für Luft- und Raumfahrzeuge denkbar.

Während in der zivilen Luftfahrt leichtgewichtige Strukturwerkstoffe den Schwerpunkt der Anwendungspotenziale von Nanomaterialien bilden, sind deren Einsatzmöglichkeiten in der Raumfahrt wesentlich vielfältiger. Dies liegt zum einen an der Vielzahl unterschiedlicher Technologie- und Anwendungsfelder, die von der satellitengestützten Erdbeobachtung, Telekommunikation und Navigation über die wissenschaftliche Erforschung des

Weltraums und die bemannte Raumfahrt bis zum Raumtransport reichen. Zum anderen erfordern die extremen Umgebungsbedingungen (Strahlung, Vakuum, mechanische Stöße und Vibrationen, große Temperaturschwankungen etc.) den Einsatz äußerst widerstandsfähiger und hochbelastbarer Werkstoffe und Komponenten, die durch nanotechnologische Lösungsansätze ermöglicht werden (Luther 2003). Als weiterer Faktor für die Verwendung nanotechnologiebasierter Materialien in der Raumfahrt ist der wirtschaftliche Anreiz zum Einsatz leichtgewichtiger, hocheffizienter, miniaturisierter Komponenten zu nennen. Leichtgewichtige Nanomaterialien werden daher auch bei höheren Rohstoffpreisen im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen vor allem in der Raumfahrt, aber auch in der Luftfahrt, ökonomische Vorteile bieten, noch bevor beispielsweise in der Automobilindustrie ein wirtschaftlicher Einsatz möglich ist.

Allerdings stehen der Anwendung von Nanomaterialien in der Luft- und Raumfahrt auch ökonomische und z. T. technologische Barrieren gegenüber. Die Entwicklung von Nanotechnologieprodukten ist in der Regel mit einem hohen finanziellen FuE-Aufwand verbunden. Da die Luftfahrt und noch mehr die Raumfahrt aufgrund der geringen Stückzahlen nur einen Nischenmarkt für Nanotechnologieunternehmen darstellt, ist die kostenintensive Entwicklung luft- und raumfahrtspezifischer Nanotechnologieprodukte häufig aus wirtschaftlichen Gründen nicht durchzuführen. Auch eigene Nanotechnologieentwicklungen durch die Luft- und Raumfahrt werden aufgrund begrenzter FuE-Budgets eher die Ausnahme bilden. Dies gilt zumindest für die europäische Luft- und Raumfahrtindustrie, während in den USA in erheblichem Umfang öffentliche Fördermittel für die Nanotechnologieforschung in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden (Roco 2001c). Darüber hinaus bestehen Synergiepotenziale mit den militärischen Technologieentwicklungen.

Im Folgenden werden die wesentlichen Anwendungspotenziale der Nanotechnologie in der Luft- und Raumfahrttechnik beschrieben, die sich überwiegend auf die Raumfahrt, teilweise auf die militärische Luftfahrt und nur begrenzt auf die zivile Luftfahrt beziehen.

Strukturwerkstoffe

Eine Anwendungsmöglichkeit von Nanomaterialien liegt im konstruktiven Bereich von Luft- und Raumfahrzeugen. Nanotechnologiebasierte Werkstoffe könnten aufgrund verbesserter mechanischer Eigenschaften (höhere Festigkeit und Beständigkeit) bei geringerer Dichte im Vergleich zu konventionellen Materialien Gewichtseinsparungen bei Luft- und Raumfahrzeugen ermöglichen, was mit erheblichen Kostenvorteilen verbunden wäre. Anwendungspotenziale ergeben sich hierbei nicht nur für Außenhäute und Strukturen von Luft- und Raumfahrzeugen, sondern auch für das Interieur wie beispielsweise Sitze und Armaturen in Flugzeugen. Bezüglich nanotechnologiebasierter Strukturwerkstoffe sind unterschiedliche Materialklassen zu betrachten:

Die mechanischen Eigenschaften von Polymeren lassen sich durch Dispersion von Nanopartikeln in der Polymermatrix gezielt verbessern. Aufgrund ihrer hohen mechanischen Festigkeit und Beständigkeit gegenüber Hitze und Strahlung haben nanopartikelverstärkte Polymere Anwendungspotenzial für diverse Strukturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt (Chen/Curliss 2001; Rice et al. 2001). Speziell Kohlenstoffnanoröhren (CNT) besitzen aufgrund ihrer außergewöhnlichen molekularen mechanischen Eigenschaften bei niedrigem spezifischen Gewicht prinzipiell ein enormes Gewichteinsparungspotenzial für die Konstruktion von Luft- und Raumfahrzeugen (NASA 2000). Von technischen Anwendungen CNT-basierter Werkstoffe ist man allerdings noch relativ weit entfernt. Dies liegt zum einen am derzeit noch sehr hohen Preis speziell der einwandigen Kohlenstoffnanoröhren (SWCNT) und zum anderen an technischen Problemen hinsichtlich der gleichmäßigen räumlichen Ausrichtung, der Adhäsion und der Beladungsrate der Kohlenstoffnanoröhren in der Polymermatrix. Hinsichtlich des letzteren Aspekts sind allerdings in jüngerer Zeit deutliche Fortschritte erzielt worden.

Durch Verstärkung von Metallen mit keramischen Fasern, insbesondere Siliziumkarbid (SiC) aber auch Aluminiumoxid oder Aluminiumnitrid, lassen sich thermisch hochbelastbare Werkstoffe mit hoher Festigkeit herstellen. Derartige Metall-Matrix-Komposite besitzen aufgrund ihrer hohen Temperaturstabilität, der geringen Dichte, der hohen Festigkeit, der hohen thermischen Leitfähigkeit und der kontrollierbaren thermischen Ausdehnung ein hohes Anwendungspotenzial für Strukturen in der Luft- und Raumfahrt und werden derzeit z. B. hinsichtlich des Ersatzes von Magnesium und Aluminium in diversen Strukturbauteilen und Außenhäuten von Raumfahrzeugen untersucht.

Auch bei Metallen und Legierungen lassen sich die thermomechanischen Eigenschaften durch Erzeugung nano-/-mikroskaliger Gefüge verbessern. Produkte aus Nanopulvern zeigen häufig eine erhöhte Härte und können superplastische Eigenschaften haben und sich daher leichter (warm-)umformen lassen. Anwendungspotenziale bieten sich neben Strukturen und Außenhäuten beispielsweise auch für Komponenten von Flüssigwasserstoffantriebssysteme (Leitungen und Turbopumpen) an.

Nanophasige Keramiken zeigen im Vergleich zu gröber strukturierten Materialien eine verbesserte Duktilität und Festigkeit sowie reduzierte Sintertemperaturen, die das Ko-Prozessieren von niedrigschmelzenden Metallen oder Verstärkungsfasern mit Keramiken ermöglichen. Einsatzpotenziale könnten sich in der Raumfahrt eventuell im Bereich transparenter Außenflächen und Sensorfenster ergeben. Ansonsten sind nanostrukturierte keramische Verbundwerkstoffe hier insbesondere als Thermal- und Oxidationsschutz von faserverstärkten Konstruktionswerkstoffen von Interesse.

Eine zurzeit noch visionäre Anwendung der molekularen Nanotechnologie ist die Herstellung intelligenter Konstruktionswerkstoffe und Funktionsmaterialien (Smart Materials) mit intrinsischen sensorischen und/oder kompensatorischen bzw. programmierbaren optischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften. Langfristige

und visionäre nanotechnologische Konzeptionen gehen jedoch weit über diese Ansätze hinaus. Dies gilt insbesondere im Bereich der Entwicklung biomimetischer Materialien mit der Fähigkeit zur Selbstorganisation, Selbstheilung und Selbstreplikation. Zielsetzung ist hierbei die Kombination synthetischer und biologischer Materialien, Architekturen und Systeme bzw. die Nachahmung biologischer Verfahren für technologische Anwendungen. Die NASA investiert einen erheblichen Teil ihrer Nanotechnologiefördermittel in diesen Bereich der Grundlagenforschung.

Energieerzeugung und -speicherung

Im Bereich der Energieerzeugung und -speicherung bieten Nanomaterialien sowie nanoskalige Schichtsysteme und Membrane Einsatzmöglichkeiten als verbesserte Elektroden und Elektrolyte in Kondensatoren (Supercaps), Batterien und Brennstoffzellen sowie für hocheffiziente Solarzellen. An Weltraumsolarzellen werden hierbei deutlich höhere Anforderungen gestellt als im terrestrischen Bereich. Zu den nanotechnologisch beeinflussten Solarzellentypen mit Raumfahrtpotenzial gehören die Quantenpunktsolarzellen, bei denen mittels Quantenpunkten die Bandlücken gezielt eingestellt werden können und sich somit die Umwandlungseffizienz erhöhen lässt.

Informations- und Kommunikationstechnik

Hinsichtlich leistungsfähiger, möglichst energiesparender Informations- und Kommunikationstechnologien besteht in der Raumfahrt ein immenser Bedarf, z. B. um die On-Board-Autonomie von Raumfahrzeugen zu verbessern, intelligente robotische Systeme zu realisieren und die zunehmende Datenflut der Nutzlast zu verarbeiten. Insbesondere in kommerziellen Anwendungsbereichen der Raumfahrt wie der satellitengestützten Telekommunikation und der Erdbeobachtung werden leistungsfähige Informationssysteme und breitbandige Datenlinks benötigt. Auch in der zivilen Luftfahrt besteht Bedarf nach verbesserten Informations- und Kommunikationssystemen, die den Komfort für die Passagiere erhöhen, wie beispielsweise großformatige Flachdisplays oder ein breitbandiger Internetzugang (Internet in the Sky). Funktionale Nanostrukturen ermöglichen hierbei auf der Ebene von Subkomponenten im Bereich der Elektronik und Optoelektronik neue Dimensionen für Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik. Diese basieren z. T. auf völlig verschiedenen physikalischen Prinzipien, können aber mit einer relativ einheitlichen Prozesstechnologie realisiert werden, die aus der Entwicklung der CMOS-Technologie (CMOS = Complementary Metal Oxide Semiconductor) abgeleitet wird. Über einen langfristigen Zeitraum bieten sich darüber hinaus künftige Alternativen der derzeitigen CMOS-Technologie, die genuin nanotechnologische Funktionselemente beinhalten und auf neuartigen Konzeptionen basieren, wie beispielsweise die Molekularelektronik, die Spintronik oder die Quanteninformationsverarbeitung. Bauteile und Komponenten, bei denen Nanostrukturen einen wesentlichen Beitrag zur Funktionalität leisten, eröffnen in diesem Zusammenhang Potenziale zur Entwicklung miniaturisierter und energiesparender Datenspeicher und Prozessoren.

Auch die Datenübertragung zwischen Raumfahrzeugen und terrestrischen Informationsnetzen kann mithilfe elektronischer und optoelektronischer Nanotechnologiekomponenten effizienter gestaltet werden. Ein hohes Potenzial wird der optischen Datenübertragung in der Raumfahrt beigemessen. Durch Optical Wireless Links (OWL) für die Intrasatellitkommunikation sowie optische Intersatellitenlinks ließen sich deutliche Massen- und Energieeinsparungen durch kleinere und leichtere Geräte sowie eine höhere Übertragungsbandbreite realisieren. Optische Intersatellitenlinks konnten weltweit erstmalig im Jahr 2001 im Rahmen der ARTEMIS-Mission der ESA demonstriert werden. Hier bieten Quantenpunktlaser aufgrund ihrer Strahlungsresistenz und des niedrigen Energieverbrauchs prinzipiell Vorteile gegenüber konventionellen Diodenlasern, die in den derzeit verwendeten Laserterminals eingesetzt werden.

Sensorik

Nanotechnologiebasierte Materialien bieten ein hohes Potenzial zur Entwicklung miniaturisierter und integrierbarer Sensoren für sehr vielfältige Anwendungsbereiche in der Luft- und Raumfahrt (z. B. Sensoren für Messungen der Geschwindigkeit, der Beschleunigung, der Position, der Temperatur, der Strömungsverhältnisse, des Druckes, chemische und optische Sensoren etc.). Bei der Herstellung derartiger Sensoren werden u. a. nanostrukturierte Materialien (z. B. nanoporöses Silizium, Kohlenstoffnanoröhren, III-Nitride, dotierte Metalloxide etc.) bzw. nanoskalige Herstellungsverfahren (CVD, Lithographie etc.) eingesetzt.

Die medizinische Versorgung und Überwachung von Astronauten zählt im Bereich der bemannten Raumfahrt zu den kritischsten Faktoren insbesondere für die Durchführung längerer Missionen. Zur Realisierung derartiger Missionen müssen erhebliche Fortschritte bei der Früherkennung von Krankheiten, der Entwicklung von autonomen Diagnosesystemen, selbstmedikativen Therapieformen für chronische und akute Erkrankungen sowie bei Notfallrettungssystemen erzielt werden. Als aussichtsreiche Ansätze der Nanotechnologie in diesem Bereich sind u. a. Sensoren zum minimalinvasiven In-vivo-Monitoring gesundheitsrelevanter Funktionen von Astronauten (z. B. der Knochendichte, des Knochenzustands, der Blutchemie), nanoskalige Drug-Delivery-Systeme zur gezielten Wirkstoffapplikation sowie Nanoemulsionen zur Behandlung akuter Vergiftungserscheinungen zu nennen. Auch im Bereich der Lebenserhaltungssysteme in bemannten Raumfahrzeugen bieten sich mögliche Anwendungsfelder nanotechnologiebasierter Materialien u. a. als hocheffiziente Gasspeichermaterialien und Wärmetauscher, Ultrafiltrationsmembranen für die Abwasseraufbereitung oder als Sensoren zur Detektion gesundheitsgefährdender Chemikalien und Pathogene.

Thermalschutz/Thermalkontrolle

Der Thermalschutz von Raumfahrzeugen ist aufgrund der extremen Temperaturanforderungen in der Raumfahrt ein

wichtiges Themengebiet. Im Bereich der Thermalschutzsysteme sind insbesondere keramische Materialien in Schutzschichten oder als Faserverbundstoffe von Bedeutung. Faserverbundkeramiken lassen sich beispielsweise für wiederverwendbare, hochtemperaturbeständige Komponenten wie Expansionsdüsen und Brennkammern von Raketenantrieben oder Steuerflächen und Hitzeschutzverkleidungen von Wiedereintrittsfluggeräten verwenden. Von Relevanz für die Entwicklung verbesserter Thermalschutzsysteme sind hier insbesondere Keramiken aus siliziumorganischen oligo- und polymeren Vorstufen für komplexe Strukturbauteile sowie Nanopulver und nanostrukturierte Fasern als Kompositbestandteil.

Die Thermalkontrolle z. B. empfindlicher Elektronikkomponenten in Raumfahrtsystemen ist ein weiteres Thema mit hoher Relevanz. Dies umfasst beispielsweise eine effiziente Abstrahlung elektronischer Verlustleistung sowie den Schutz vor äußeren Temperaturschwankungen. Nanomaterialien bieten verschiedene Ansatzpunkte für eine verbesserte Thermalkontrolle von Raumfahrtsystemen. So können nanostrukturierte diamantartige Kohlenstoffschichten thermische Kontrollsysteme verbessern, da sie eine ca. viermal höhere Leitfähigkeit als Kupfer besitzen und in einem weiten Temperaturbereich beständig sind.

3. Bauwesen

Auf den ersten Blick erscheint ein direkter Bezug zwischen dem Hightechgebiet Nanotechnologie und dem eher traditionell erscheinenden Bauwesen nicht offensichtlich. Doch sind gerade alle zementgebundenen Baustoffe, wie vor allem Betone, Paradebeispiele für Nanostrukturwerkstoffe, da ihre mechanische Festigkeit ausschließlich auf der Ausbildung mineralischer Nanofilze beruht. Potenzielle Anwendungen gibt es auch im Bereich der Armierungen. So können zukünftig für Spezialanwendungen (z. B. Brückenbau) Stahlarmierungen vermehrt durch Polymer- oder Glasfasern ergänzt bzw. ersetzt werden, die zusätzlich zur mechanischen Verstärkung andere Funktionen wie die Überwachung von Belastungssituationen und Schadensbildung übernehmen können. Bei der Herstellung oder Funktionalisierung dieser Fasern können Nanoaspekte zukünftig eine wichtige Rolle spielen. Noch weitgehend hypothetisch sind die Überlegungen zum Einsatz von nanoröhrenverstärkten Faserverbünden (Chung 2001b; Leung 2001).

Generell gilt, dass im allgemeinen Gebäuderohbau, bei dem die rein konstruktiven Materialeigenschaften bestimmend sind, die etablierten Baustoffe aus Kostengründen auch zukünftig konkurrenzlos sind. Das eigentliche Potenzial für nanotechnologische Anwendungen dürfte im Ausbaubereich liegen.

Baustoffe

Zement gehört wahrscheinlich zu den ältesten bekannten, vom Menschen geschaffenen Nanostrukturwerkstoffen und ist ein Sinterprodukt aus Kalk- und Tonmineralien. Durch Vermengen des Zements mit Wasser erfolgt spontan die Reaktion zu Calcium-Silicat-Hydrat-Phasen (CSH), die nadelförmig mit Durchmessern im Nanometerbereich und Längen bis weit in den Mikrometerbereich hinein auf Zement- oder Zuschlagsstoffpartikeln aufwachsen. Diese Nanofasern und -nadeln verschränken sich zunehmend zu einem Nanofilz, der für die Erstfestigkeit aller zementbasierten Baustoffe verantwortlich ist. Diese sich durch kollektive Wirkung unregelmäßiger Nanostrukturen ergebende primäre Makrofestigkeit wird durch selbstorganisiertes Wachstum von Nanostrukturen unter Aufzehrung von Zementpartikeln weiter konsolidiert.

Im Bau mit Hochleistungsbetonen nehmen Zusatzstoffe einen immer größeren Platz ein. Siliziumdioxidnanopartikel in synthetischen Kieselsäuren (Nanosilica) werden als Zusatzmittel für Spritz- und Hochleistungsbetone eingesetzt. Sie steigern die Dichtigkeit des Gefüges und tragen zur Verbesserung der Haftzug- und Haftscherfestigkeit zwischen Beton und Bewehrungsstahl oder zwischen Alt- und Neubeton im Fall von Betonsanierungen (z. B. von Brücken) bei. Nanosilica ist auch für Bauten im Trinkwasserbereich geeignet. Darüber hinaus bieten diese Zusatzmittel im Gegensatz zu kunststoffmodifizierten Mörteln keine Wachstumsgrundlage für Mikroorganismen.

Bei der Verwendung von Karbonstahl oder Edelstahl als Baumaterial ist z. B. durch nanometerdünne Multilagenbeschichtung aus leitenden Polymeren ein verbesserter Korrosionsschutz realisierbar (Kraljić et al. 2003; Tan/Blackwood 2003). Die Nanotechnologie bietet auch ein großes Potenzial für das Design und die Herstellung pH-sensitiver Trägerwerkstoffe, die eine kontrollierte Freisetzung pH-Wert-korrigierender Flüssigkeiten erlauben.

Die Nanotechnologie ermöglicht die Herstellung maßgeschneiderter Bindemittel und Klebstoffe sowie neuer Kompositbaustoffe, die im Brandfall keine giftigen Gase freisetzen. Sie zeichnen sich nicht nur durch eine hohe Temperaturbeständigkeit aus, sondern haben zugleich eine bessere Flexibilität, höhere Festigkeit und geringere Rissempfindlichkeit (Baustoff-Technik 2001; Duda 2001).

Wärmedämmung/Wärmeschutz

Heute werden zur Gebäudewärmedämmung meist polymere Materialien oder mineralische Fasern eingesetzt. Prinzipiell ist es jedoch möglich, die Wärmeleitung von Stoffen deutlich zu reduzieren. Ein wichtiger Punkt ist die Unterdrückung der Wärmeleitung durch die Luft oder das Gas in den meist hochporösen Materialien. Dies gelingt durch Verkleinerung der Poren, wie dies in Aero- oder Nanogelen erfolgt. Dieses Konzept wird vor allem bei transparenten Wärmedämmungssystemen (TWD) verfolgt. TWD-Elemente zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine niedrige Wärmeleitfähigkeit mit einem hohen Transmissionsgrad für Solarstrahlung verbinden (FhG-ISE 2002; FhG-ISE o. J.; Isoteg o. J.).

Auch Fensterflächen lassen sich durch geeignete Beschichtung zur transparenten Wärmedämmung einsetzen. So reflektiert z. B. eine wenige nanometerdicke, unsichtbare

Silberschicht auf Architekturglas die infrarote Wärmestrahlung weitgehend, ohne die Durchlässigkeit für sichtbare Lichtstrahlen nennenswert zu beeinträchtigen (AIF o. J.).

Elektrochrome, gasochrome sowie thermotrope Nanoschichten im Glas reagieren auf äußere Einflüsse und verändern selbstständig die Durchlässigkeit der Sonnenstrahlung. Die Klimaregelung sowie die Raumbeleuchtung durch Tageslicht kann gerade an Sonnentagen optimal eingestellt werden, ohne dabei die Sicht durch die Fenster einschränken zu müssen. So können beispielsweise elektrochrome Fenster die Lichttransmission stufenlos zwischen 80 und 20 % variieren. Sie arbeiten sehr energiesparend, weil sie nur während der Veränderung ihres Zustandes, die wenige Minuten andauert, Energie benötigen (Baustoff-Technik 2001; Duda 2001).

In Fassaden und Fenster integrierte thermotrope Schichten vermindern unerwünschte Aufheizung des Gebäudes. Sie ändern ihre optischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur und benötigen keine Energieversorgung (FhG-ISE o. J.).

Eine weitere Verbesserung erreicht man durch die Evakuierung der Systeme. Heute gibt es erste Produkte auf dem Markt, in denen pyrogene Kieselsäure oder Nanogele zwischen Folienverbundsystemen verpackt sind. Die Wärmeleitung gegenüber konventioneller Dämmung ist um einen Faktor 5 bis 10 verringert. Hier ergibt sich ein sehr großes Anwendungspotenzial vor allem im Bereich der Altbausanierung (FhG-ISE 2002).

Ein interessantes Anwendungspotenzial bieten die so genannten sorptiven Materialien (Zeolithe und Silicagele). Sie basieren darauf, dass in nanostrukturierten porösen Materialien über adsorptive Prozesse Flüssigkeiten angelagert und entsprechende Energien aufgenommen oder abgegeben werden. Diese Systeme können als hocheffektive Wärmespeicher und als chemische Wärmepumpen genutzt werden. Erste Systeme sind in Klimaanlagen bereits heute im Einsatz. Durch Optimierung der Strukturen lassen sich jedoch voraussichtlich noch deutliche Verbesserungen erreichen (FhG-ISE 2002).

Außenflächen

Enorme Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen gibt es derzeit bei den selbstreinigenden und den photokatalytischen Oberflächen. Hierbei handelt es sich um die Kombination von speziellen strukturellen, physikalischen und chemischen Eigenschaften, die letztendlich zur gewünschten Gesamteigenschaft führen (FhG-ISE 2002).

Die Reinigung von Fenstern oder Fassaden sind ein kostenträchtiger Punkt bei der Langzeitgebäudenutzung. Die Nanotechnologie bietet hier Easy-to-clean-Beschichtungen oder selbstreinigende Oberflächen an. Es gibt bereits erste schmutzabweisende Fassadenfarben und Beschichtungen für die unterschiedlichsten Oberflächen wie Glas, Kunststoff oder Beton auf dem Markt. Aufgrund hydro- und oleophober Wirkung finden Schmutzpartikel wie Fette, ölige Stoffe, Kalk sowie Schmutzpartikel eine geringere Haftung auf den Substraten und lassen sich leicht, d. h. ohne großen Aufwand an Reinigungsmitteln, entfernen (Caparol o. J.; Duda 2001).

Ein anderer Selbstreinigungseffekt beruht auf der Photokatalyse. Oberflächen, die nach diesem Prinzip wirken, sind stark hydrophil und enthalten Titandioxidnanopartikel. Diese Partikel wirken katalytisch und erzeugen bei UV-Einstrahlung in Gegenwart von Feuchtigkeit Wasserstoffperoxid, das organische Verschmutzungen auf der Oberfläche zersetzt, sodass diese vom Regen abgespült werden können (Baustoff-Technik 2001; Duda 2001; Sachtleben 2003).

Neben Selbstreinigungseffekten können durch geeignete Beschichtungen auch weitere Funktionen wie Anti-Graffiti-Schutz, hohe Kratz- und Abriebfestigkeit bei Kunststoffen, Korrosionsschutz bei Metallen oder Anti-Fingerprint-Schutz für Edelstahloberflächen (z. B. durch transparente Nanokompositbeschichtungen) eingestellt werden. Ebenso werden derzeit Kunststofffolien mit dem selbstreinigenden Lotuseffekt entwickelt, die nanostrukturiert und wasserabstoßend sind. Mögliche Anwendungsfelder ergeben sich z. B. bei Dächern und Fensterrahmen oder Duschkabinenwänden. Es besteht hier jedoch noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um diese Systeme auch optimiert und langzeitstabil einsetzen zu können (Duda 2001).

Moderne Verglasungen schützen nicht nur das Gebäude oder den Nutzer vor unerwünschter Sonneneinstrahlung, sondern können auch als solare Heizungen dienen, die die Wärmeeinstrahlung in Kombination mit geeigneten nanostrukturierten Photovoltaikzellen direkt in elektrische Energie umwandeln. So werden z. B. nanokristalline Dünnschichtsolarzellen bereits zur Energieerzeugung in Form von vollständigen Dächern oder Fassaden eingesetzt (Thyssen-Solartec o. J.).

Auch bei nicht optimalen Einstrahlwinkeln (z. B. an Fassaden) lassen sich mit Dünnschichtsolarzellen hohe Leistungswerte erzeugen. Durch Verwendung von nanokristallinem Silizium produzieren die Elemente auch bei bewölktem Himmel, Nebel, Teilabschattung oder großer Wärme im Sommer hohe Erträge. Dadurch lassen sich im Jahresmittel bis zu 20 % mehr Strom als mit konventionellen kristallinen Modulen erzeugen (Thyssen-Solartec o. J.).

Nanopartikel auf Basis von Titandioxid eröffnen neue Möglichkeiten, Materialschädigung durch UV-Einstrahlung zu verringern. Die UV-Strahlung wird durch das Titandioxid absorbiert und in Wärmeenergie umgewandelt. Im Gegensatz zu organischen Substanzen wird das chemisch inerte Titandioxid nicht abgebaut und erhöht auf diese Weise die Langzeitstabilität des gesamten Systems. Titandioxidnanopartikel als Additive für Holzschutzmittel bewahren helle Hölzer vor dem Nachdunkeln und Vergilben (Sachtleben 2003).

Innenbereich

Im Innenbereich schützen Titandioxidnanopartikel als Additive in Lacken vor Verfärbungen, die durch Kunstlicht und Tageslicht verursacht werden. Insbesondere ge-

beizte oder mit Wachs behandelte Möbel und Parkettböden dunkeln kaum nach. Ebenso gibt es bereits besonders kratzfeste Parkettlacke (z. B. nanoskalige Kieselsäurepartikel in einer Polymermatrix von der Firma Degussa) auf dem Markt (Duda 2001; Sachtleben 2003).

Ebenfalls marktgängig sind pflegeleichte Easy-to-clean-Oberflächen von Sanitärkeramiken. Die Keramiken werden z. B. mit einer eingebrannten nanometerdicken Antihaftbeschichtung aus Fluorpolymeren angeboten, die Schmutz und Wasser abperlen lässt und gleichzeitig abriebfest ist. Die Beschichtung kann mittlerweile auch nachträglich in flüssiger Form vom Endverbraucher selbst aufgetragen werden. Allerdings hat diese Beschichtung eine geringere Lebensdauer (Baustoff-Technik 2001; Duda 2001; Nanogate o. J.).

Durch Beschichtung mit nanoskaligen Materialien ist es darüber hinaus möglich, die Farbe von Tapeten oder Keramikflächen bei Lichteinstrahlung zu verändern (Baustoff-Technik 2001; Duda 2001).

Ebenso sind spezielle Brandschutztüren auf Basis der Nanotechnologie herstellbar, die sich in ihrem Aussehen nicht von herkömmlichen Türen aus Holz und Glas unterscheiden. Bei Feuereinwirkung wandelt sich die transparente Nanokompositbeschichtung in einen feinporigen Schaum um, der das darunter liegende Material schützt. Auch ein Einsatz bei Fenstern, Zwischenwänden usw. wäre denkbar (Baustoff-Technik 2001).

Mithilfe der Nanotechnologie und der damit verbundenen, zum Teil neuen Verfahren wird der maßgeschneiderte Werkstoff gerade im Bauwesen immer wahrscheinlicher. Der Wunschbaustoff kann mit multifunktionalen Oberflächen ausgestattet werden, die z. B. besonders kratzfest oder schmutzabweisend sind. In vielen Fällen ist die zur Realisierung notwendige Basistechnologie bereits vorhanden, sodass nur noch relativ wenig Aufwand zur Fertigstellung des Endprodukts betrieben werden muss. Da sich in diesem Zusammenhang eine breite Vielfalt an Möglichkeiten ergibt, ist die Gesamtheit der zukünftigen Möglichkeiten im Gebäudebau und der Gebäudeausstattung noch gar nicht zu übersehen (Duda 2001).

4. Textilindustrie

Die deutsche Textilindustrie hat ihre Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen intensiviert, um durch Integration neuer funktionaler Eigenschaften in textile Materialien einen Zusatznutzen zu erzeugen, der über den konventionellen Grundnutzen teilweise weit hinausgeht und damit einen Wettbewerbsvorteil gegenüber der Billigkonkurrenz aus Osteuropa und Fernost sichern soll. Bei technischen Textilien haben diese verstärkten Forschungs- und Entwicklungsbemühungen bereits seit Jahren zu Zuwachsraten geführt, die sich im Wesentlichen aus Innovationen ergeben. Ein ähnlicher Effekt wird nun auch bei Bekleidungs- oder bei Haus- und Heimtextilien angestrebt.

Intelligente Textilien ist der allgemeine Oberbegriff für die Funktionalisierung von Textilien mit über den Grundnutzen hinausgehenden chemischen, biologischen oder physikalischen Effekten, zu denen ausdrücklich auch elektronische Funktionalitäten gerechnet werden. Smart Clothes steht in diesem Zusammenhang für die Kombination von textiler Bekleidung mit Mikroelektronik. Wearable electronics, e-textiles und Textilien mit elektrophysikalischen Eigenschaften sind weitere, häufig verwendete Bezeichnungen (ITV Denkendorf 2002a). In diesen Bereich gehört die zunehmende Integration von Informations- und Kommunikationstechnologien einschließlich der zugehörigen Energieversorgung, um mit der Bekleidung z. B. auch Computerfunktionalitäten zur Verfügung zu stellen. Gearbeitet wird auch an der Implementierung einer umfangreichen Sensorik, die für den Träger wichtige innere oder äußere Messwerte aufnehmen soll. In Teilbereichen ist die Forschung und Entwicklung an intelligenten Textilien heute bereits etabliert. Aus übergeordneter Sicht gesehen befindet sich das Gebiet aber immer noch in einer relativ frühen Phase.

Das gilt auch für den Teilbereich, der sich mit der Nutzung nanostrukturierter Materialien befasst. In diesem Zusammenhang gibt es eine Reihe von zum Teil wenig realistischen Visionen, welche neuen Funktionalitäten in Textilien durch den Einfluss von Nanotechnologien erreicht werden könnten. Diese reichen von der möglichen Implementierung von flexiblen Nanoröhren zum Transport von Kühlflüssigkeiten an bestimmte Stellen der Bekleidung bis hin zur Integration von Nanorobotern, die einem Kleidungsstück eine ausgeprägte Selbstreparaturfähigkeit verleihen sollen.

Größere Erfolgschancen haben Bemühungen um Verbesserungen z. B. bei Knitterfreiheit, Flecken bzw. Wasser abstoßenden Eigenschaften, antistatischen Merkmalen, Atmungsaktivität oder Verschleißfestigkeit von Textilien. Auch die Ausrüstung mit Stoffen, die als Depot z. B. für pharmazeutische Wirksubstanzen dienen können, gehört in diesen Bereich. Hier gibt es teilweise bereits kommerzielle Produkte, die auf Nanotechnologien basieren. Oft spielen dabei Beschichtungen oder die Nutzung von an der Oberfläche modifizierten Fasern eine entscheidende Rolle. Teilweise sind die eingesetzten Methoden oder Werkstoffe umweltfreundlicher und gesundheitlich unbedenklicher als bisher genutzte Verfahren oder Materialien mit ähnlicher Wirkung. Die entscheidenden Aspekte für die Durchsetzung am Markt sind und bleiben aber ökonomischer Art.

Verschiedene Unternehmen sowie branchenbezogene Forschungsinstitute sind im Bereich nanotechnologisch verbesserter Textilien kommerziell aktiv. Insgesamt erscheinen die Bemühungen um die Nutzbarmachung nanotechnologiebasierter Effekte in Textilien jedoch relativ uneinheitlich und unkoordiniert. Die damit verbundenen Zukunftschancen werden erst langsam realisiert. Entsprechend vielschichtig ist die Berichterstattung über das Thema.

Neben den Verbesserungen an Textilien selbst erzielt die Branche durch den Einsatz nanostrukturierter Werkstoffe im Spinnereimaschinenbau ebenfalls deutliche Fortschritte. Die wichtigsten Neuerungen erfolgen in den Bereichen, in denen die Textilfäden mit hoher Geschwindigkeit laufen,

also insbesondere bei den Fadenführern. Hier finden sowohl nanoskalige Beschichtungen konventioneller Werkstoffe wie auch massive nanokristalline Bauteile, v. a. aus technischer Keramik, Verwendung.

Den ersten kommerziellen Erfolg mit nanostrukturierten Materialien in Textilien hatte die Firma Nano-Tex aus den USA. Ihre Produkte entstehen durch Veränderung der Fasern auf molekularer Ebene. Dazu werden in bestimmter Weise geformte Nanopartikel in den Oberflächen der Fasern eingebaut. Das geschieht durch Eintauchen in eine wässrige Lösung, wobei sich die Partikel aus Kohlenwasserstoffen an die Fasern anlagern und an deren Oberfläche eine Art Flaum aus permanenten molekularen Haken bilden.

Die aus den entsprechend modifizierten Fasern hergestellten Gewebe (Nano-Care, Nano-Dry, Nano-Pel oder Nano-Touch) zeichnen sich durch neue bzw. verbesserte Eigenschaften aus. Diese variieren je nach Form der angelagerten Nanopartikel. Typisch sind Atmungsaktivität und Dampfdurchlässigkeit, Flecken und Wasser abstoßende Charakteristika oder eine weitgehende Knitterfreiheit. Dazu kommt die Möglichkeit, die besten Baumwoll- mit den besten Synthetikeigenschaften in einer Faser zu kombinieren. Das gelingt durch Umgeben synthetischer Fasern mit baumwollartigen Hüllen. Die erreichten Verbesserungen sind dauerhaft und verschlechtern sich mit der Zeit nicht wieder (Nano-Tex o. J.; Russell 2001).

Zu den ersten Firmen, die kommerzielle Textilien mit auf Nanotechnologien basierendem Zusatznutzen anbieten, gehört die Firma Schöller aus der Schweiz. Deren neue Ausrüstungstechnologie heißt NanoSphere und ersetzt bisher in der Textilveredelung verwendete halogenierte, paraffin- oder silikonhaltige Chemikalien, die ökologisch problematisch sein können. Das Wasser und Schmutz abweisende Verfahren funktioniert wie bisher bekannte Imprägnierungen, ist aber schadstofffrei und beinhaltet zudem eine einfache, fast selbstständige Regenerationsfähigkeit (Russell 2001; SVT 2001).

Eine interessante Nutzungsmöglichkeit nanostrukturierter Werkstoffe hat die Firma Gore-Tex im Zusammenhang mit antistatischer Schutzkleidung realisiert. Elektrische Entladungen sorgen in bestimmten Arbeitsumgebungen für hohe Gefährdungspotenziale. Die neue Gore-Tex-„Workwear anti-static“ führt mehrere Schutzfunktionen zusammen und geht dabei einen neuen Weg. Eingebettet zwischen einem beliebigen Obermaterial und einem Innenfutter ist eine antistatische Membran aus PTFE (Teflon). In dieser Membran sind nanoskalige Kohlenstoffpartikel dispergiert, die eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit bereitstellen. Zusätzlich zur Antistatikfunktion ist die Membran wind- und wasserabweisend sowie atmungsaktiv (Eickhoff/Scheppat 2000).

Der patent- und markenrechtlich geschützte Lotuseffekt steht inzwischen für eine weltweit anerkannte verfahrenstechnische Methode zur Herstellung extrem antiadhäsiver ultraphober Werkstoffe. Auch im Textilbereich zeichnet sich eine Fülle innovativer Anwendungen ab. Viele Gewebe besitzen bereits eine hervorragende Mikrostruktur. Durch eine entsprechende Nanostrukturierung und Hydrophobierung können sie grundsätzlich neue Eigenschaften erhalten. Damit zeichnen sich vollkommen neue Möglichkeiten im Bereich von Outdoor-Anwendungen ab. Für den Bereich der technischen Textilien lassen leichte, auch bei strömendem Regen trockene und selbstreinigende Bautextilien einen weiteren Wachstumsschub erwarten. In Deutschland wird die Umsetzung des Lotuseffektes im Textilbereich durch das Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf koordiniert (Barthlott/Neinhuis 2001; ITV 2002b).

Sowohl im Bereich der technischen als auch der Bekleidungstextilien spielt die Funktionalisierung von Faser- oder Gewebeoberflächen mit Biopolymeren wie Chitosan oder Pektin eine zunehmende Rolle. Für solche biopolymer ausgerüsteten Textilwaren werden Anwendungen als bioaktive Fasermaterialien für den Medizinbereich, Substrate für die Wundheilung, Textilien für sensible Haut (Allergiker) oder Textilien mit Depotwirkung von Pharmaka erwartet.

Außerdem besteht die Möglichkeit, neue Textilien mit Klimafunktion zu entwickeln und das Mikroklima zwischen Haut und Textil zu regulieren.

Bereits heute realisierbar ist die Funktionalisierung der Faseroberflächen mit Cyclodextrinen. Dabei handelt es sich um Zuckermoleküle, die eine torusförmige Gestalt aufweisen. Der Hohlraum in den Molekülen führt zu einem hydrophoben Charakter. In diesen hydrophoben Hohlraum kann eine Vielzahl unpolarer organischer Moleküle als Depot eingelagert werden. Damit sind Textilien mit Funktionalitäten wie Parfümdepot, Wirkstoffdepot (z. B. zum UV-Schutz) oder Bindung unangenehmer Gerüche (z. B. Körpergeruch) ausrüstbar (IDW 2002; Knittel 2002).

Darüber hinaus gibt es verschiedene Möglichkeiten, in das Grundmaterial von Fasern anorganische nanostrukturierte Materialpartikel einzubringen. Damit könnten die verschiedensten Effekte erzielt werden. So könnte das Einbringen von Tonpartikeln in Nylon zu effektiven Feuerschutzsystemen führen. Nanotechnologiebasierte schwer entflammbare Systeme sollen in Heimtextilien einen Markt finden (Laperre 2002; Smith 2002).

Interessante Perspektiven könnte die prinzipielle Option bieten, Kohlenstoffnanoröhren in die Fasern einzubinden und damit Festigkeiten zu erreichen, die z. B. weit über die der bekannten Kevlarfasern hinausgehen. Auf diese Weise hergestellte superfeste Gewebe sollen ihre Anwendung in Produkten wie schusssichere Westen, Wetterballone oder Fallschirme finden. Darüber hinaus werden sie vor allem in Verbundwerkstoffen eingesetzt werden (Holister/Harper 2002).

Winzige Modifikationen der Fasern bzw. Gewebe im Nanometermaßstab könnten auch zu weit reichenden Konsequenzen für die Fertigungstechnik im Textilbereich führen. So wird daran gedacht, die Verbindung zwischen verschiedenen Stoffteilen ohne sichtbare Säume oder Nähte realisierbar zu machen. Dazu könnten an den Rändern von Stoffzuschnitten integrierte mechanische Ha-

ken/Ösen-Systeme dienen. In diesem Zusammenhang wird auch die Herstellung intelligenter Reißverschlüsse diskutiert (Russell 2001).

Eine Fertigungstechnik mit viel Potenzial für nanostrukturierte Textilien ist das Elektrospinnen (Electrospinning), das im Prinzip bereits seit vielen Jahren bekannt ist. Es eignet sich zur Herstellung verschiedenster Polymerfasern mit Durchmessern im Nanometerbereich. Die Technik funktioniert, wenn eine auf der Oberfläche einer Polymerlösung oder -schmelze erzeugte elektrische Spannung so groß wird, dass die Oberflächenspannung überwunden werden kann und ein elektrisch geladener Strahl herausschießt. Die so erzeugten Fasern können zu Textilien mit verschiedenen maßgeschneiderten Eigenschaften weiterverarbeitet werden. So gibt es bereits seit längerem eine Anwendung im Bereich der Filtrationsmaterialien. Die hier eingesetzte Technologie könnte auch zu einem möglichen Schutz vor chemischen Kampfstoffen führen. Weitere Bemühungen richten sich auf hochfeste Leichtbauwerkstoffe für die Luft- und Raumfahrt oder den ballistischen Schutz. Weiterentwicklungsbemühungen auf dem Gebiet des Elektrospinnens konzentrieren sich auf eine wesentliche Verkleinerung der bisher notwendigerweise großen und energieintensiven Anlagen (Laperre 2002; Smith 2002).

Bei den technischen Textilien spielen die im Baubereich eingesetzten Vertreter eine herausgehobene Rolle. Hier sind besondere Anwendungsperspektiven von zusätzlichen Funktionalitäten, z. B. im Bereich der optischen Wirkung und insbesondere von adaptiven Eigenschaften, zu erwarten. Wünschenswert sind darüber hinaus Maßnahmen zur Verbesserung des Schutzes gegen abrasive mechanische Belastung. Eine wesentliche Rolle in diesem Zusammenhang spielt die Gestaltung von Oberflächeneigenschaften durch Applizierung anorganisch-organischer Hybridpolymere mithilfe der Sol-Gel-Technik. Damit werden aufgrund der vielfältigen Variationsmöglichkeiten Beschichtungen mit verschiedensten Eigenschaften zugänglich. So können durch die Anbindung perfluorierter Seitenketten an das organische Netzwerk Gradientenmaterialien erzeugt werden, die sich durch Transparenz, Kratz- und Abriebbeständigkeit sowie Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen auszeichnen und ein dauerhaft oleophobes und hydrophobes Verhalten aufweisen.

Die Erhöhung der Kratzfestigkeit ist dabei z. B. durch die Einbindung von Al_2O_3 erreichbar. Der Zusatz von Fe_2O_3 kann zu Beschichtungen mit bestimmten magnetischen Eigenschaften führen, der von ZnO zu einem ausgeprägten UV-Schutz. Weiterhin kann auch das antistatische Verhalten verbessert werden. Durch Modifizierungen des Sol-Gel-Verfahrens besteht außerdem die Möglichkeit, die optischen Eigenschaften zu verändern. Auch bioaktive Reagenzien können eingebettet werden. Prinzipiell ist es möglich, beliebige antimikrobielle Substanzen in Sol-Gel-Schichten zu immobilisieren und kontrolliert freizusetzen.

So bietet die Sol-Gel-Technik vielfältige Möglichkeiten zur Funktionalisierung und Veredelung von Textilien, wobei man allerdings nicht bei jeder einzelnen Realisierung von einer Nanotechnologie im eigentlichen Sinn sprechen kann. Insgesamt steht die Entwicklung erst am Anfang. Für schnelle Fortschritte ist eine enge und intensive Zusammenarbeit zwischen Materialwissenschaftlern und Textilforschern notwendig (Böttcher 2001; Textor et al. 2002 u. 2001).

5. Energiewirtschaft

Von Entwicklungen im Bereich der Nanotechnologie werden unter anderem Fortschritte bei Solarzellen, Brennstoffzellen, wiederaufladbaren Batterien und möglicherweise beim Energietransport erwartet, die einen sehr großen Einfluss auf die zukünftige Energieproduktion und Energieverteilung haben könnten.

Solarzellen

Die Umwandlung von solarer Energie in elektrischen Strom kann bei den etablierten Halbleitersolarzellen durch Verwendung nanotechnologischer Werkstoffe in ihrer Effizienz gesteigert werden. Solarzellen werden aber für die lokale Energieversorgung in vielen Bereichen erst interessant werden, wenn ihre Preise deutlich sinken und sich die elektrische Energie effektiv und kostengünstig speichern lässt. Die entscheidende Kostenreduktion bei Solarzellen ist eher von Farbstoff- und organischen Polymersolarzellen zu erwarten. Hier werden die notwendigen Durchbrüche erst mit Nanotechnologie erreicht; allerdings stecken diese Typen von Solarzellen noch in der Forschungs- bzw. Entwicklungsphase.

Energiespeicher

Speichermöglichkeiten für chemische Energie in Form von Wasserstoff und für elektrische Energie in Batterien oder Kondensatoren profitieren von der Nanotechnologie (Schlapbach/Züttel 2001; Tarascon/Armand 2001).

Von Bedeutung für eine Wasserstoffenergiewirtschaft ist, ob Speichermöglichkeiten für Wasserstoff einen Reifegrad erreichen, der den breiten Einsatz von mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen in Fahrzeugen ermöglicht. Letztendlich sind Systeme, die eine mit Benzin oder Diesel vergleichbare Energiedichte aufweisen, das Ziel. Ob dieses Ziel mit Metallhydridspeichern oder Nanoröhren erreicht werden wird, ist allerdings fraglich. Da Wasserstoff derzeit nicht mit einer derartigen Dichte gespeichert werden kann, ist davon auszugehen, dass Brennstoffzellen für Antriebszwecke ihren Wasserstoff aus vorgeschalteten Reformern erhalten, die z. B. Methanol oder andere Kohlenwasserstoffe umsetzen.

Bei portablen Geräten ist in naher Zukunft zu erwarten, dass Batterien immer mehr durch Brennstoffzellen ersetzt werden, wobei als Brennstoff in Metallhydrid gespeicherter Wasserstoff oder aber in Direktbrennstoffzellen umgesetztes Methanol verwendet werden wird. Langfristig dürften aufladbare Batterien, deren Eigenschaften, wie vor allem die Ladezeit, durch Nanowerkstoffe immer noch weiter verbessert werden können, an Bedeutung

verlieren und in Nischenanwendungen zurückgedrängt werden.

Wie bei Batterien gibt es auch bei Superkondensatoren Fortschritte durch nanoporöse Elektrodenmaterialien. Die Kombination eines solchen Superkondensators mit sehr hoher Kapazität und Leistungsdichte mit einer Batterie hoher Energiedichte ist besonders für Traktionszwecke vielversprechend. Aber auch in portablen Geräten wie Mobiltelefonen kann die Kombination aus Batterie und Superkondensator zur besseren Ausnutzung der Batterieleistung genutzt werden. Es ist allerdings nicht zu erwarten, dass Batterien als Energiespeicher für elektrische Fahrzeuge weite Verbreitung finden werden, da sie in der Speicherdichte dem System Brennstoffzelle/Methanol unterlegen sind.

Energiewandler

Die Verbreitung von Brennstoffzellen ist derzeit noch vor allem durch ihren hohen Preis sehr eingeschränkt. Aus der Nanotechnologie stammende Verbesserungen bei Membranen, Katalysatoren und Elektroden werden Brennstoffzellen preiswerter und leistungsfähiger machen. Sollten die Produktionskosten stark sinken, hätte dies einen großen Einfluss auf die gesamte Energieinfrastruktur, denn der Einsatz stationärer Brennstoffzellenanlagen in Haushalten und in der Industrie würde den gegenwärtigen Trend zur Dezentralisierung der Energienutzung nochmals erheblich verstärken. Zuerst werden Brennstoffzellen aber bei tragbaren elektronischen Geräten eingesetzt werden. Dort ist die Speicherdichte für Wasserstoff nicht ganz so entscheidend wie bei Fahrzeugen mit ihrem hohen Energiebedarf (Brian et al. 2001).

Auch Verbrennungsmotoren, die in ihrer technischen Entwicklung bereits sehr weit fortgeschritten sind, können in vielen Bereichen von der Nanotechnologie profitieren. Oberflächen, die weniger Reibung erzeugen oder bei höheren Temperaturen eingesetzt werden können, erhöhen die Lebensdauer und den Wirkungsgrad. Im Bereich der Abgasnachbehandlung von Benzin- und Dieselmotoren spielt die Nanotechnologie in Form von Katalysatormaterialien zur chemischen Umwandlung der Abgase und in Form von nanoporösen Filtern gegen die Emission von Partikeln eine Rolle. Auch wird an katalytischen Nanopartikeln als Kraftstoffzusatz geforscht, die den Verbrennungsvorgang und damit auch die Schadstoffemission optimieren sollen.

Bei Gasturbinen, wie sie im stationären Betrieb zur Stromerzeugung und im mobilen Betrieb als Flugzeugtriebwerke zum Einsatz kommen, dienen Nanoschichten sowie über nanoskalige Vorstufen hergestellte hochtemperaturfeste Strukturwerkstoffe zur Erhöhung der Verbrennungstemperaturen, wodurch sich der Wirkungsgrad erhöhen lässt.

Im Bereich der Raketentriebwerke bieten spezielle nanoskalige Aluminiumpulver als Bestandteil fester, flüssiger oder zukünftiger gelförmiger Treibstoffe Vorteile. Sie brennen schneller als gewöhnliche Aluminiumpulver ab und erhöhen die Verbrennungseffektivität.

Energietransport

Nicht unumstritten sind die Hoffnungen, mithilfe nanotechnologischer, bei Raumtemperatur supraleitender Materialien die hohen Leitungsverluste, die in unserer derzeitigen zentralisierten Energieversorgung durch die langen Leitungswege auftreten, zu mindern. Derzeit gibt es nur Leitungen, die mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden müssen, was zwar im Einzelfall zu Einsparungen führen kann, aber immer mit hohen Investitionskosten verbunden ist. Zwar sind nanokristalline keramische Supraleiter weniger spröde und damit in ihren mechanischen Eigenschaften besser für den Stromtransport geeignet, aber dramatische Durchbrüche auf dem Weg zu Raumtemperatursupraleitern sind nicht in Sicht (Larbalestier et al. 2001).

6. Chemische Industrie

Von der Nanotechnologie wird erwartet, dass die Chemische Industrie aus ihr neue Innovationsdynamik schöpfen kann. So bildet die chemische Nanotechnologie einen Schwerpunkt bei der Förderung von Vorhaben mit Relevanz für industrielle Anwendungen durch das BMBF.

Viele Produkte der Chemischen Industrie, die heute im Bereich Nanotechnologie angesiedelt werden, gibt es schon seit Jahrzehnten. Zu den traditionellen nanoskaligen Produkten gehören u. a. feinteilige Pulver wie Katalysatoren, Polymerdispersionen, Pigmente und Füllstoffe, deren Partikelgröße Voraussetzung für ihre Funktionalität ist. So wird bei Katalysatoren beispielsweise die hohe Oberfläche nanostrukturierter Oxide oder Metalle genutzt, um chemische Reaktionen Kosten sparend und umweltschonend durchzuführen. Diese Produkte werden in seit langem etablierten Herstellungsverfahren erzeugt. Darüber hinaus zeichnen sich in vielen Bereichen neue Nanoprodukte ab, von denen viele aufgrund ihres potenziellen Marktvolumens wirtschaftliche Relevanz besitzen.

Die Herstellung von Nanopartikeln erfordert je nach den gewünschten Eigenschaften des Pulvers hinsichtlich chemischer Zusammensetzung, Korngröße, Kornform, Agglomerationsverhalten und Weiterverarbeitbarkeit unterschiedliche Verfahren. Verbesserte Analysemethoden helfen dabei, die Herstellung nanoskaliger Produkte zu überwachen und durch Charakterisierung der Partikeleigenschaften den Zusammenhang mit den funktionalen Eigenschaften aufzuklären. Besonders interessant ist bei der Herstellung nanoskaliger Strukturen das Prinzip der Selbstorganisation, das vor allem für Sensorschichten und Biomaterialien kostengünstige Herstellung ermöglichen kann.

Katalyse

Katalysatoren setzen die zum Reaktionsverlauf benötigte Aktivierungsenergie herab, der katalysierte Prozess läuft schneller, spezifischer und damit wirtschaftlicher ab bzw. wird überhaupt erst ermöglicht. Nanopartikel, Nanopulver, Nanoschichten und nanoporöse Materialien bieten auf das Volumen bezogen eine

enorm große Oberfläche, an der Reaktionen ablaufen können, und damit eine potenziell höhere Leistungsfähigkeit. Gerade in Zeiten steigender Energie- und Rohstoffpreise und unter dem ökologischen Zwang zur umweltfreundlichen Produktion wird die Bedeutung von Katalysatoren weiter zunehmen.

In der Petrochemie nutzt man bereits seit Jahrzehnten natürlich vorkommende nanoporöse Zeolithe. Diese werden inzwischen auch künstlich hergestellt, wobei die Porendurchmesser und die Oberflächeneigenschaften anwendungsspezifisch maßgeschneidert werden. Beim Kracken von Erdöl bleiben derzeit noch ca. 20 % des Erdöls ungenutzt. Dies versucht man mit maßgeschneiderten nanoporösen Materialien und Mikroreaktionstechnik zu verbessern.

War man lange bei der Entwicklung von Katalysatoren auf empirische Methoden und Erfahrung angewiesen, so ist man zunehmend in der Lage, mit nanoanalytischen Verfahren die Mechanismen katalysierter Reaktionen im Detail aufzuklären. Parallel nimmt aber auch die Bedeutung kombinatorischer Methoden für das Screening neuer nanoporöser Katalysatoren zu. Es ist daher zu erwarten, dass verbesserte Katalysatoren und Katalyseprozesse entwickelt werden können, wobei man von neuen Produktionsmethoden für Nanomaterialien profitieren wird.

Füllstoffe

Bei Füllstoffen handelt es sich um feste Partikel, die zur Optimierung der Eigenschaften eines Materials als Zusatzstoffe beigemischt werden.

Nanopartikuläre Tone werden bereits in großem Maßstab und mit deutlichen Zuwachsraten als Füllstoff für Polymere verwendet. Solche Nanokomposite sind vor allem im Automobil- und Flugzeugbau von Bedeutung, sie bieten aber auch andere Eigenschaften, die sie für weitere Applikationen interessant machen. Ein Beispiel ist die Verwendung für Lebensmittelverpackungen wegen der geringen Gasdiffusion. Einen geringeren Umfang wird die Nutzung von Nanopartikeln aus Metallen und Metalloxiden in Polymeren haben. Denkbar sind Anwendungen, bei denen elektrische Leitfähigkeit und Abschirmung gefordert werden.

Große Bedeutung als Füllstoffe könnten Nanoröhren erlangen, sobald sie ausreichend günstig produziert werden können. Mit ihnen hergestellte Kompositmaterialien könnten wesentlich verbesserte mechanische Eigenschaften bieten.

Traditionell wurde bei der Reifenherstellung meistens technischer Ruß als verstärkender Füllstoff in der Gummimischung eingesetzt. Mit der Einführung von Kieselsäure als Alternative bzw. Ergänzung zum Ruß in den 1990er-Jahren wurde die Leistungsfähigkeit der Reifenlauffläche wesentlich verbessert. Solche im großen Maßstab produzierten klassischen nanoskaligen Füllstoffe werden ständig weiterentwickelt, um je nach Anwendung die Leistung zu optimieren. So ist für manche Bereiche eine besonders hohe Rauhigkeit der Rußpartikel von Vorteil, weshalb in jüngster Zeit Nanoruße mit besonderer Strukturierung entwickelt wurden.

Pigmente/Beschichtungen/Schmierstoffe

Vor allem für optische Effekte (z. B. Farbeffekte) und für elektronische Eigenschaften von Materialien spielen nanoskalige Strukturen eine wichtige Rolle. Sichtbares Licht lässt sich durch Nanostrukturen in weitem Umfang beeinflussen. Diese Möglichkeiten werden schon für neue Farbeffekte bei Autolackierungen, Kunststoffen, Druckfarben und in der dekorativen Kosmetik genutzt. Bereits seit langem wird mit besonders feinem Industrieruß als Farbpigment tiefschwarzer Klavierlack hergestellt.

Auch für funktionale Aspekte spielen Nanoeffekte eine große Rolle. Beschichtungsmaterialien können vor UV-Strahlung oder Korrosion schützen, die Härte und Kratzfestigkeit von Oberflächen verbessern oder sie schmutz- und wasserabweisend machen. Chemisch inerte Schichten sind für die gesamte Reaktionstechnik von Bedeutung. Eine etablierte Anwendung sind Anti-Fouling-Anstriche für Schiffe. Keramische Beschichtungen erlauben verbesserte Hitzeresistenz und Abriebfestigkeit und sind z. B. für die Innenwände von Motorenzylindern, für Turbinenteile oder für die thermisch beanspruchte Oberfläche sehr schneller Flugzeuge interessant. Metallgefüllte Nanokomposite und nanokristallisierte metallische Gläser können zur Strahlungsabschirmung von elektronischen Bauteilen dienen. Photochrome und elektrochrome Beschichtungen für Fenster, die unter der Einfluss von Licht bzw. von elektrischer Spannung ihre Farbe ändern, könnten vor allem im Bauwesen von großem Interesse sein.

Auch die Eigenschaften von Schmierstoffen können durch Nanopartikel verbessert werden. So werden bereits Kupferpartikel in Schmieröl zur Verringerung des Motorverschleißes eingesetzt.

Mikro-/Nanoreaktionstechnik

In der heterogenen Katalyse werden derzeit mit Mikroreaktoren außerordentlich erfolgreiche und wirtschaftlich attraktive Prozessführungen möglich. Eine neue Generation von Mikroreaktoren wird mit definierten nanostrukturierten Katalysatoren als Füllung und mit hohem Strömungsdurchsatz bei großer innerer Oberfläche entwickelt. Dies ermöglicht den Einsatz einer breiten Palette alternativer, komplex aufgebauter Katalysatoren.

Chemische Reaktionen können auch in so genannten Nanoreaktoren stattfinden. Dabei kann es sich um supramolekulare Aggregate wie Nanokapseln, Mizellen oder Nanoporen handeln.

Membranen und Filter

Nanoporöse Membranen können in vielen industriellen Prozessen wie Abwasseraufbereitung, Schadstoffbeseitigung und Nebenproduktabtrennung Anwendung finden (Ultrafiltration), da es immer besser möglich wird, Porengrößen im Nanobereich kontrolliert herzustellen. Die

Kosten können im Vergleich zu anderen Trennverfahren deutlich geringer sein.

Massenmärkte für nanoporöse Membranen könnten die Verwendung in Batterien und Brennstoffzellen sowie Filtrationstechniken zur Herstellung von Labor- und Trinkwasser werden.

Pharma

Nanopartikel können zum kontrollierten bzw. zielgenauen Transport von medizinisch wirksamen Stoffen eingesetzt werden, da sie wegen ihrer Größe leicht die Zellmembran durchdringen können. Dabei können Medikamente oder genetisch veränderte Substanzen durch den Einbau in Nanopartikel mit spezifischer Oberflächenfunktionalisierung in ganz bestimmte Zellen eingebracht und freigesetzt werden. Auch kann durch Mikronisierung die Verarbeitung und Darreichung wasserunlöslicher Wirkstoffe, z. B. Vitamine, verbessert werden.

Ein weiteres Anwendungsfeld liegt in der Herstellung von ultradünnen Beschichtungen, dem Einbau von Nanopartikeln bzw. der topographischen Strukturierung im Nanometerbereich von Medizin- und Dentalwerkstoffen, um die Biokompatibilität zu verbessern. Durch die Schaffung von körperähnlichen Oberflächen auf dem Implantat mittels der chemischen Nanotechnologie werden diese von den Körperzellen besser akzeptiert. Die Gefahr der Immunantwort wird reduziert.

Im Bereich der Kosmetik werden Nanopartikel in größerem Maßstab für den Sonnenschutz eingesetzt. Mineralische UV-Filter aus Titandioxid werden im Gegensatz zu organischen UV-Absorbern nicht von der Haut aufgenommen und zeichnen sich durch besonders gute Hautverträglichkeit und hervorragende Stabilität aus. Je kleiner die Partikel in der Mischung, desto dichter bedecken sie die Haut und schützen vor der Sonne. Wegen der Nanoskaligkeit der Partikel ist die Schutzschicht im sichtbaren Bereich transparent.

7. Zusammenfassung

Potenziale für Anwendungen der Nanotechnologie bestehen in praktisch allen Industriezweigen, auch in solchen, die eher zu den Lowtechbranchen gerechnet werden. Die hier analysierten sechs Branchen – Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrtindustrie, Bauwesen, Textilindustrie, Energiewirtschaft und Chemische Industrie – repräsentieren einen bedeutsamen Ausschnitt aus dem zukünftigen industriellen Gesamtpotenzial der Nanotechnologie.

Automobilindustrie

Im Automobilbau der Zukunft wird nanotechnologische Kompetenz zu den Kernfähigkeiten gehören, die erforderlich sind, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit dieser für die deutsche Volkswirtschaft so wichtigen Branche zu erhalten. Das Spektrum nanotechnologischer Innovationsbemühungen im Automobilbau reicht von bereits eingesetzten Komponenten über konkrete Entwicklungsaktivitäten bis hin zu Ideen mit allenfalls langfristiger Realisierbarkeit. Zum Teil handelt es sich dabei um grundlegend neue Entwicklungen mit weit reichenden Auswirkungen auf das Produkt. Es werden Spin-off-Effekte in viele andere Branchen hinein erwartet.

Nanotechnologische Entwicklungen können in allen Subsystemen bzw. Komponenten des Automobils eine Rolle spielen. Beispiele sind:

- Nanopartikel als Füllstoff in Autoreifen (realisiert, Weiterentwicklung),
- Antireflexbeschichtungen (realisiert),
- nanopartikelverstärkte Polymere und Metalle (Entwicklungsphase, zum Teil realisiert),
- nanotechnologisch modifizierte Klebetechniken und Haftvermittler (in Entwicklung),
- katalytische Nanopartikel als Zusatz in Kraftstoffen (Forschungsstadium),
- nanoporöse Filter zur Minimierung der Emission von Partikeln im Nanometerbereich (Zukunft),
- hydrophile Oberflächenschichten als Antibeschlagschichten (Zukunft),
- selbstausheilende Lacke, z. B. durch Selbstorganisation (allenfalls langfristig).

Luft- und Raumfahrtindustrie

Auch in der Luft- und Raumfahrtindustrie bestehen für die Nanotechnologie mittel- bis langfristig erhebliche Anwendungsmöglichkeiten. Im Bereich der Raumfahrt sind diese Möglichkeiten besonders vielfältig, andererseits sind hier die Anforderungen an die technologische Leistungsfähigkeit der Komponenten oft extrem hoch. Ökonomische Anwendungsbarrieren ergeben sich aus der Höhe des erforderlichen finanziellen Aufwands für die Entwicklung von Nanotechnologieprodukten bei gleichzeitig niedrigen Stückzahlen, vor allem im Bereich der Raumfahrt.

Wichtige Anwendungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Strukturwerkstoffe (z. B. Gewichts- und Energieeinsparung durch Einsatz leichtgewichtiger, hochfester nanotechnologiebasierter Materialien), Informations- und Kommunikationstechnik (z. B. effizientere Gestaltung der Datenübertragung zwischen Raumfahrzeugen und terrestrischen Informationsnetzen mithilfe elektronischer und optoelektronischer Nanotechnologiekomponenten), Sensorik (z. B. Verbesserung der medizinischen Überwachung von Astronauten durch Sensoren auf der Basis nanostrukturierter Materialien) und Thermalschutz/Thermalkontrolle (z. B. Verbesserung thermischer Kontrollsysteme durch nanostrukturierte diamantartige Kohlenstoffschichten).

Bauwesen

Das Bauwesen ist eher als Lowtechbranche einzustufen. Dennoch gibt es hier eine Fülle von Möglichkeiten für

Anwendungen nanotechnologischer Entwicklungen. So können Siliziumdioxidnanopartikel in synthetischen Kieselsäuren (Nanosilica) als Zusatzmittel für Spritz- und Hochleistungsbeton eingesetzt werden und zur Verbesserung der Haftzug- und Haftscherfestigkeit zwischen Beton und Bewehrungsstahl beitragen. Durch nanometerdünne Multilagenbeschichtung aus leitenden Polymeren ist ein verbesserter Korrosionsschutz bei Verwendung von Karbonstahl oder Edelstahl als Baumaterial realisierbar. Weitere Anwendungen finden sich im Bereich der Gebäudewärmedämmung (z. B. Einsatz von Fensterflächen zur transparenten Wärmedämmung durch Aufbringen einer wenige nanometerdicken, unsichtbaren Silberschicht), bei der Außenflächengestaltung (z. B. Einstellung von Funktionen wie Selbstreinigung, Anti-Graffiti-Schutz oder hohe Kratz- und Abriebfestigkeit bei Kunststoffen durch geeignete Beschichtungen) und im Innenbereich (z. B. Einsatz von Titandioxidnanopartikeln als Additive in Lacken zum Schutz vor Verfärbungen durch Kunst- und Tageslicht).

Textilindustrie

In der Textilindustrie ist ein großer Teil der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen darauf gerichtet, durch Integration neuer funktionaler Eigenschaften in textile Materialien einen Zusatznutzen – und damit einen Wettbewerbsvorteil gegenüber der Billigkonkurrenz – zu erzeugen. Der Teil dieser Aktivitäten, der sich mit der Nutzung nanostrukturierter Materialien befasst, befindet sich noch in einer relativ frühen Phase. Es gibt hier einerseits einige wenig realistische Visionen, wie etwa die Integration von Nanorobotern, die einem Kleidungsstück eine ausgeprägte Selbstreparaturfähigkeit verleihen sollen. Durchaus erfolgversprechend dürften andererseits die Bemühungen um Verbesserungen bei Eigenschaften bzw. Funktionen wie Knitterfreiheit, Atmungsaktivität, Verschleißfestigkeit, Abstoßen von Flekken und Wasser, Antistatik, Wirkstoffdepot oder Feuerschutz sein.

Energiewirtschaft

Von Entwicklungen im Bereich der Nanotechnologie werden erhebliche Einflüsse auf die zukünftige Energieproduktion und Energieverteilung erwartet. Zu nennen sind vor allem nanotechnologiebedingte Fortschritte bei Solarzellen, bei der Speicherung von Energie und bei Brennstoffzellen.

Hoffnungen, mithilfe nanotechnologischer, bei Raumtemperatur supraleitender Materialien die hohen Leitungsverluste unserer zentralisierten Energieversorgung zu reduzieren, sind umstritten.

Chemische Industrie

Die Chemische Industrie ist eng mit der Entwicklung der Nanotechnologie verknüpft: Sie ist einerseits Lieferant wesentlicher Grundstoffe, andererseits zukünftiger Nutzer nanotechnologiebasierter verfahrenstechnischer Innovationen. Von der Nanotechnologie wird erwartet, dass die Chemische Industrie aus ihr neue Innovationsdynamik schöpfen kann.

Zahlreiche Produkte der Chemischen Industrie, die heute dem Bereich Nanotechnologie zugerechnet werden, gibt es schon seit Jahrzehnten. In vielen Bereichen zeichnen sich aber neue Nanoprodukte ab, die aufgrund ihres potenziellen Marktvolumens wirtschaftlich relevant sind.

Hauptanwendungsgebiete der Nanotechnologie in der Chemischen Industrie sind die Katalyse, die Erzeugung von Füllstoffen, Pigmenten, Beschichtungen und Schmierstoffen, die Mikro-/Nanoreaktionstechnik, Membranen und Filter sowie Pharma und Kosmetik.

VI. Vertiefungsthema: Anwendungen der Nanotechnologie in der Informations- und Kommunikationstechnik

Den IuK-Techniken wird eine Schlüsselrolle in der zukünftigen technischen und wirtschaftlichen Entwicklung zugewiesen. Dabei wird sich die Einführung von Produkten der Nanotechnologie weitgehend unsichtbar vollziehen, da für die Konsumenten die Funktionalität der Geräte und Systeme und nicht deren technologische Basis im Vordergrund steht. So werden bei großen Computerfestplatten bereits heute die zu Nanotechnologie zählenden GMR-Leseköpfe verwendet, ohne dass dies den Kunden als revolutionäre Neuerung bewusst geworden wäre.

Die Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnik beruhen in hohem Maße auf der Verfügbarkeit von neuartigen elektronischen, optischen und optoelektronischen Bauelementen. Durch diese werden immer komplexere Systemlösungen realisierbar, auf der anderen Seite fordern immer komplexere Anwendungstechniken aber auch die Entwicklung leistungsfähigerer oder neuer Komponenten heraus.

Eine solche wichtige Vision ist das Ubiquitous Computing. Darunter wird die Allgegenwart von Informationsverarbeitung, die umfassende Vernetzung von Menschen und technischen Geräten und der damit einhergehende jederzeitige Zugriff auf Informationen von beliebiger Stelle aus verstanden. Neben neuen Materialien können vor allem kleine, leistungsfähige und preiswerte Sensoren und Prozessoren dazu beitragen, dass es bald miniaturisierte und spontan miteinander kommunizierende Rechner im Überfluss geben kann, die mit der alltäglichen Umgebung zu „smart objects“ verschmelzen. Diese technischen Entwicklungen eröffnen faszinierende neue Anwendungsperspektiven, die mit den Begriffen mobiles Büro, intelligentes Haus, Wearable Computing oder „continuous wellness and health support“ beschrieben werden (Gershenfeld 1999; Mattern 2001). Darüber hinaus entwickeln sich z. B. mit der Bioinformatik und der Kryptographie Bereiche, die eine extrem leistungsfähige Informationstechnik benötigen. Manche dieser neuen Anwendungsfelder (z. B. das DNA-Computing) erfordern auch völlig neue Systemarchitekturen (Kolo et al. 1999). Schließlich eröffnen sich an den Schnittstellen zwischen bislang getrennten Disziplinen neue Anwendungsmöglichkeiten (Köhler 2001).

Für die Realisierung dieser Visionen werden der Nanotechnologie zuzurechnende technische Entwicklungen eine wichtige Rolle spielen. Für viele neue Bauelementekonzepte ist die Umsetzung von Verfahren der Nanotechnologie eine unverzichtbare Voraussetzung, auch einige neue Systemarchitekturen werden erst mit nanotechnologischen Ansätzen realisiert werden können. Die wichtigsten Anwendungsperspektiven der Entwicklungen im Bereich der Nanoelektronik liegen dabei entlang der vertikalen Wertschöpfungsketten der Informationstechnik (Datenverarbeitung, Telekommunikation und Multimedia) mit horizontalen Ausstrahlungspotenzialen auf die Solar- bzw. Energietechnik, den Maschinen- und Anlagenbau, die Luft- und Raumfahrt, die Medizintechnik, die Mikrosystemtechnik sowie die biologische und chemische Prozesstechnik. Dabei besteht noch erheblicher Gestaltungsbedarf im Hinblick auf Entwicklungsrichtungen, Rahmenbedingungen und Voraussetzungen, unter denen sich diese Entwicklung vollziehen soll.

In den folgenden Kapiteln werden ausgewählte nanotechnologische Entwicklungen erläutert, die Auswirkungen auf Bauelemente und Systeme für die Informationsverarbeitung, -übertragung, -speicherung und -darstellung haben könnten. Zunächst werden in Kapitel 1 der derzeitige Statusquo und die Grenzen der Top-down-Strategie beleuchtet. In Kapitel 2 werden dann neue Bauelementekonzepte insbesondere für Speicher und Logikbausteine vorgestellt. In Kapitel 3 und 4 werden Entwicklungen in der Optoelektronik und den Displaytechniken untersucht. Neue Systemarchitekturen – insbesondere DNA-Computing und Quanten-Computing – werden in Kapitel 5 behandelt. Kapitel 6 widmet sich der Anwendungsvision der allgegenwärtigen informationstechnischen Systeme (Ubitious Computing).

Die Ausführungen basieren auf zwei Gutachten des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung (FhG-ISI 2002 a u. b).

1. Statusquo und Grenzen der Top-down-Strategie

1.1 Konventionelle Halbleitertechnik und Top-down-Nanotechnologie

Die Mikroelektronik als technische Basis der Informations- und Kommunikationstechnik beschäftigt sich bereits seit vielen Jahren mit Strukturen, die kleiner als 100 nm sind. Sie ist seit geraumer Zeit der wichtigste Motor eines industriellen Trends zur Miniaturisierung. Der damit verbundene konservative Ansatz eines evolutionären und allmählichen Überganges von der Mikro- zur Nanotechnologie (Top-down-Nanotechnologie) wird auch in den nächsten zehn bis 15 Jahren zur weiteren Verkleinerung von Halbleiterbauelementen sowie zur Erhöhung von Rechen- und Speicherleistung beitragen und so die Produkte und Verfahren der IuK-Industrie weiter verbessern. Ihre Kommerzialisierung wird FuE-Arbeiten für eine großmaßstäbliche Fertigung anstoßen und eine Refinanzierung von Forschungsarbeiten in einer traditionell umsatzstarken Branche gestatten. Im Folgenden sollen wichtige Entwicklungen kurz beleuchtet werden.

Auch wenn unter Experten strittig ist, ob die mit der klassischen Mikroelektronik verbundenen Techniken, Verfahren und Komponenten der Nanotechnologie zuzurechnen sind oder nicht, werden sie für deren weitere Entwicklung eine wichtige Rolle spielen. Insbesondere deshalb, weil man auf beträchtliche wissenschaftliche und technische Vorarbeiten zurückgreifen kann, da man in der Halbleitertechnik über umfangreiche Erfahrungen mit dem Arbeiten auf der sub-Mikrometer-Skala und über viele dafür notwendige Werkzeuge verfügt.

Die Entwicklung der Integrationsdichte bei integrierten Schaltkreisen wird beschrieben durch das schon 1965 aufgestellte so genannte Erste Moore'sche Gesetz, eine nach dem Intel-Mitbegründer Gordon E. Moore benannte Regel (Moore 1965 u. 1979), derzufolge sich die Anzahl der Bauelemente in integrierten Schaltungen alle 18 Monate verdoppeln werde (Abbildung 18). Der Zusammenhang erwies sich nicht nur als richtig, sondern auch als außerordentlich robust – er gilt bis heute fort.

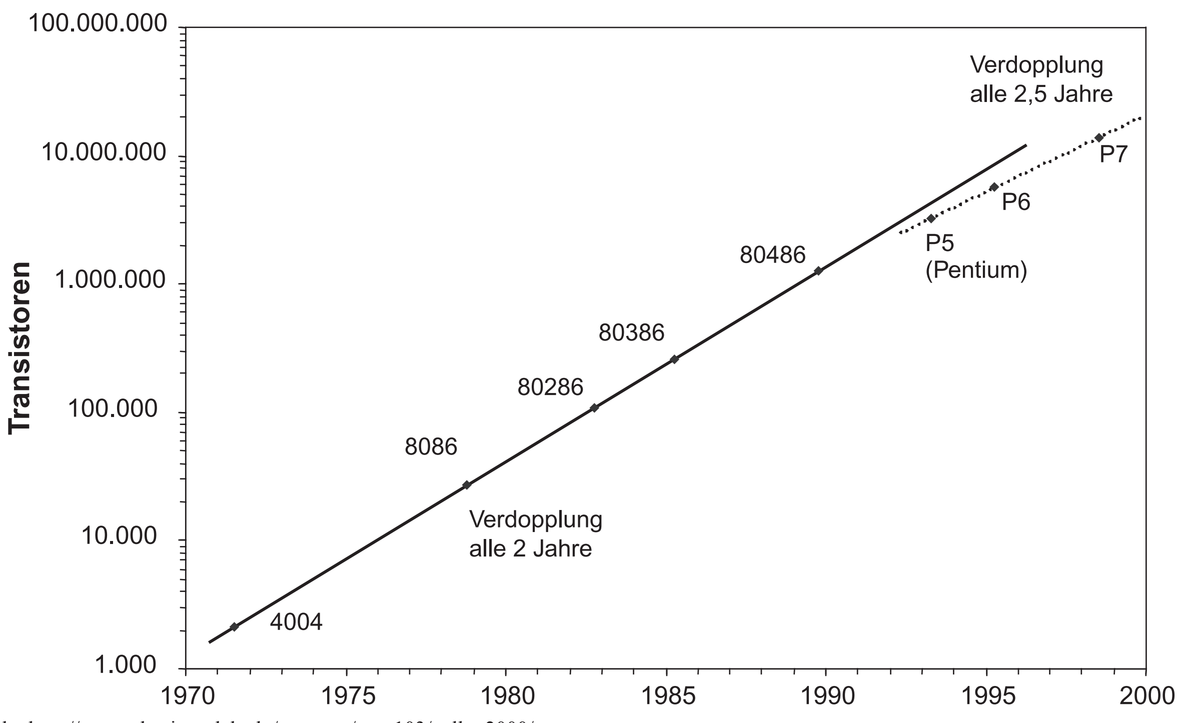
Ob Moores Gesetz allerdings auch die Entwicklung der kommenden Jahre richtig beschreibt und wann das Erreichen einer physikalisch-technischen Grenze der weiteren Erhöhung der Integrationsdichte ein Ende setzen wird, ist weitgehend unklar. Für weite Teile der Halbleiterindustrie beschreibt Moore das weiterhin vorherrschende Paradigma. Man geht davon aus, dass die Regel auch noch für die nächsten zehn bis 15 Jahre Gültigkeit behalten wird. Zwar prophezeien einige das nahende Ende der Miniaturisierung, da die verwendeten Materialien, die Herstellungsprozesse, der immer komplexer werdende Aufbau und letztlich die Gesetze der Physik weiteren Verkleinerungen Grenzen setzen würden. Bislang haben die Entwickler jedoch alle potenziellen Barrieren überwunden.

Die von einem internationalen Industriekonsortium regelmäßig erstellte International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS 2001) zeigt – aufbauend auf dem Moore'schen Gesetz – die Entwicklungen und zukünftigen Trends in der Halbleiterindustrie auf. Dabei wird die Verdopplung der Komponenten eines integrierten Schaltkreises von drei Faktoren beeinflusst: Fortschritte bei der Auflösung in der Lithographie tragen mit 50 %, die Vergrößerung der Chipfläche und die Verkleinerung der Komponenten – im Wesentlichen der Transistoren – mit jeweils 25 % zur Gesamtentwicklung bei. Als Bezugsgröße für die weitere technische Entwicklung wird in der ITRS die Größe von Funktionselementen (so genannte Technologie-Knoten) verwendet[22]. Für die Zeit bis 2016 wird in der aktuellen ITRS die in Abbildung 19 aufgezeigte Entwicklung der Technologieknoten prognostiziert.

[22] Dies ist beispielsweise bei Logikschaltkreisen (CMOS) die Länge des Gates.

Abbildung 18

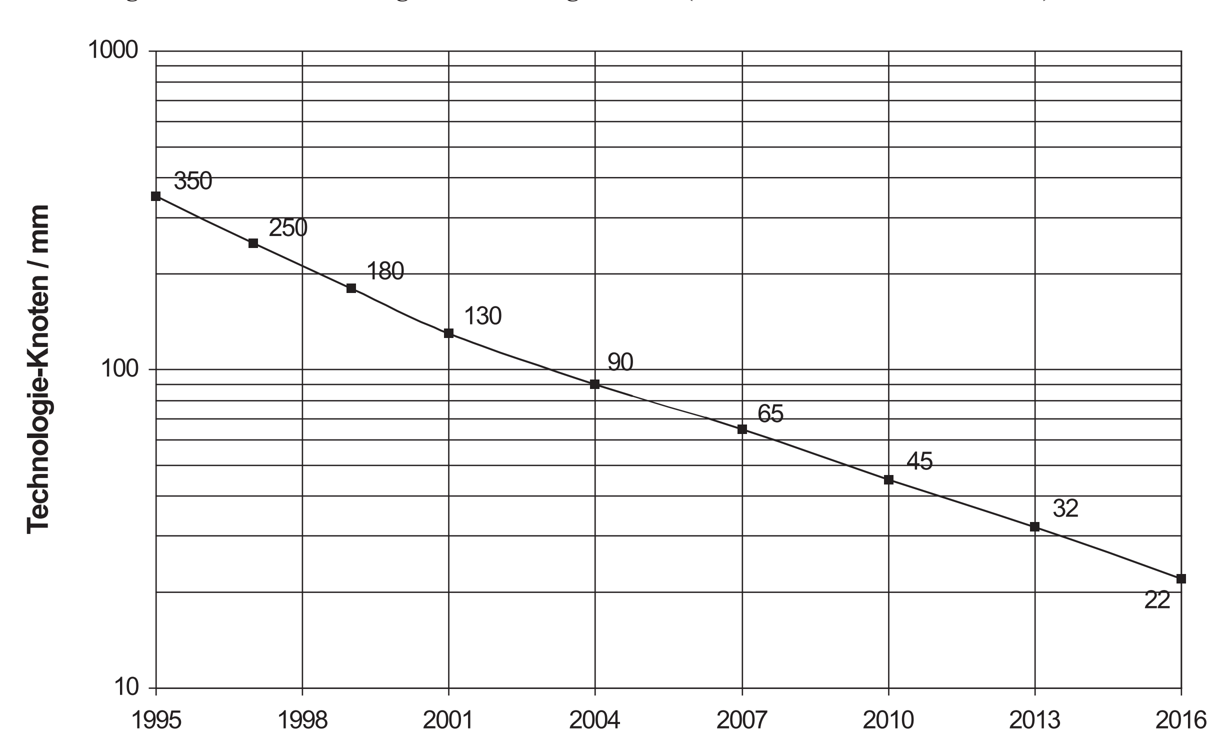
Entwicklung der Integrationsdichte bei Intel-Mikroprozessoren



Quelle: http://www.physics.udel.edu/~watson/scen103/colloq2000/

Abbildung 19

Prognostizierte Entwicklung der Technologieknoten (ITRS Rounded Node Numbers) bis 2016



Quelle: ITRS 2001

Durch neue Materialien und Verfahren konnten die Moore'schen Prognosen in den letzten Jahren übertroffen werden und ein Ende der Entwicklung wurde immer weiter hinausgezögert. Heute sind allerdings grundlegende Grenzen der optischen Lithographie erkennbar, die sich nicht weiter hinausschieben lassen werden. Mit dem Wissen um diese Grenzen bemühen sich Wissenschaft und Industrie um neue Verfahren, die die Fortschreibung von Moores Gesetz für die CMOS-Technologie in den nächsten fünf bis zehn Jahren erlauben sollen. Auf diese Weise sollen im Jahr 2011 eine Milliarde Transistoren in einem Chip integriert werden können (ITRS 2001).

Vor diesem Hintergrund gewinnt allerdings das so genannte Zweite Moore'sche Gesetz an Bedeutung, demzufolge die Kosten für die Fertigungsanlagen proportional zur Zahl der Transistoren auf einem Schaltkreis wachsen. Einige Experten gehen davon aus, dass eher die wachsenden Investitionskosten für notwendige neue Fabriken der Fortschreibung des Trends des Ersten Moore'schen Gesetzes Grenzen setzen – und auf diesem Wege möglicherweise eher Technologiewechsel anstoßen, als dies infolge des Erreichens physikalischer Grenzen zu erwarten wäre.

1.2 Entwicklungen und Grenzen von Bauelementen und Fertigungsverfahren in der klassischen Halbleiterelektronik

Logikbausteine (z. B. Prozessoren) und Speicherbausteine (z. B. RAM) bilden die Grundlagen der Computertechnik. Beide lassen sich durch das geeignete Zusammenschalten von Transistoren und Dioden realisieren. Ein Schlüsselelement der heutigen Mikroelektronik ist somit der Transistor. Für hochintegrierte Digitalschaltungen werden Transistoren heute als MOSFET (Metalloxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor) realisiert. Seit Mitte der 80er-Jahre (mit der Einführung der 1-MB-DRAM-Speicher) werden sie in der so genannten CMOS-Technologie (für Complementary Metal Oxide Semiconductor) ausgeführt, die kleinere Strukturgrößen bei gleichzeitig aber deutlich höherer Komplexität ermöglichte. Ein wichtiger Gesichtspunkt der CMOS-Technologie ist somit, dass sie eine Technikplattform bildet, mit der sowohl Speicher- wie auch Logikbausteine realisiert werden können. Ziel der weiteren Entwicklung ist es, bei immer kleinerer räumlicher Ausdehnung die gewünschten Transistoreigenschaften wie hohe Schaltgeschwindigkeiten, geringe Schaltleistung und hohe Integrationsdichte zu erreichen.

Bei Strukturgrößen von weniger als 20 nm beginnen quantenmechanische Effekte zu dominieren und die gewünschte Funktion des Bauteils zu stören. Bei der kontinuierlichen Weiterentwicklung der CMOS-Technologie wurden diese Hindernisse bereits vor Jahren erkannt und erste Lösungen entwickelt, mit denen sich der Einfluss von Quanteneffekten zwar nicht beseitigen, wohl aber abschwächen lässt. Dabei verfolgt die Industrie zwei fundamental verschiedene Ansätze (Hutchby et al. 2002): die Verwendung neuer Materialien innerhalb des klassischen CMOS-Konzeptes und die Entwicklung neuer Transistorstrukturen. Wesentliche Materialinnovationen sind das Silicon on Insulator-(SOI-)Verfahren, Silizium-Germanium-Heterostrukturen, die Verwendung so genannter III-V-Halbleiter (z. B. GaAs, InP) anstelle des Basismaterials der Halbleitertechnologie Silizium sowie der Einsatz von Leiterbahnen aus Kupfer anstelle von Aluminium. Gegenwärtig verfolgte alternative Designs der Transistoren sind der Double Gate Transistor, der FinFET und der Vertikale Transistor.

Die Halbleiterproduktion ist in der Regel eine Massenproduktion, bei der ein hoher Durchsatz bei geringen Kosten zu erzielen ist. Darum bedarf es schneller und kostengünstiger Verfahren zur Übertragung von Elektronikstrukturen von Vorlagen auf die Ausgangsmaterialien der Schaltkreisfertigung. Gegenwärtig bedient man sich dazu der optischen Lithographie. Hierbei wird zuerst mit einem Laserstrahl die gewünschte Struktur auf eine Maske aus Glas, die mit einer Chromschicht und einer lichtempfindlichen Polymerschicht überzogen ist, übertragen. Die entwickelte Maske wird mit ultraviolettem Licht und mit einem Linsensystem verkleinert auf den Siliziumwafer projiziert, auf dem sich eine Fotolackschicht befindet. Durch Ätzen lässt sich nun die Struktur auf das Silizium übertragen. Dieser Vorgang wird (mit anderen Masken) so lange wiederholt, bis die vollständige funktionale Struktur im Silizium eingebracht ist. Die einmalige Erstellung der Masken ist mit hohen Kosten und großem Zeitaufwand verbunden. Die Masken dürfen keine Fehler enthalten, da diese immer wieder übertragen werden würden. Die Erzeugung von Strukturen auf dem Wafer hingegen sollte schnell und preiswert erfolgen.

Die produktionstechnischen Grenzen in der CMOS-Technologie sind mit den Grenzen der Lithographie eng verknüpft. Optische Lithographieverfahren werden charakterisiert durch die Wellenlänge des eingesetzten (Laser-)Lichtes. Durch eine Verringerung der Wellenlänge wurde es möglich, die kritischen Bauteilabmessungen im Lauf der Zeit immer weiter zu verkleinern. Dabei bedingt ein Wechsel der Wellenlänge z. T. erhebliche Innovationen bei den verwendeten Masken (bis hin zu neuen Grundmaterialien) und Umstellungen bzw. Weiterentwicklungen bei der optischen Apparatur. Zusätzliche Verbesserungen in der Maskenherstellung („phase shift masks“ und „optical proximity correction“) sowie das so genannte Top Surface Imaging und die Silylierung der Fotolacke tragen dazu bei, die physikalischen Grenzen der optischen Lithographie immer weiter hinauszuschieben und heute mit Belichtungswellenlängen zu arbeiten, die größer als die zu erzielenden Strukturgrößen sind.

Für die Herstellung von lateralen Strukturen mittels optischer Lithographie gelten heute 90 nm als absolute untere Grenze. Experten nehmen allerdings an, dass lithographische Verfahren entwickelt werden können, die auch für die Herstellung kleinerer lateraler Strukturen verwendet werden können. Als mögliche Nachfolger der optischen Lithographie gelten die Extreme Ultraviolett-(EUV-)Lithographie, die Röntgenlithographie und die

Partikelstrahllithographie. Diese so genannten Next Generation-Lithography-Methoden verwenden als Belichtungsquelle Wellenlängen weit unterhalb des sichtbaren Lichts bzw. einen Partikelstrahl aus Elektronen bzw. Ionen. Welches Verfahren sich zur Einführung des 65-nm-Technologieknotens durchgesetzt haben wird, ist noch ungewiss, da alle drei angeführten Lithographiemethoden sich noch – in verschiedenen Stadien – in der Entwicklung befinden.

Der Bedarf an einfacheren und preiswerteren Herstellungsmethoden hat schon vor Jahren die Suche nach unkonventionellen Verfahren angeregt. Das Resultat sind Abwandlungen von aus dem Alltag bekannten mechanischen Verfahren, nämlich Drucken, Stempeln, Formen und Prägen. Diese Verfahren werden unter dem Oberbegriff Soft Lithography (Weich-Lithographie) zusammengefasst.

Beim Imprintingverfahren wird das mit einem Polymer überzogene Substrat erhitzt, und der durch optische Lithographie oder Elektronenstrahllithographie hergestellte Stempel wird aufgedrückt. Nach einem Abkühlungszyklus wird der Stempel bei ca. 50 °C abgehoben. Zurück bleibt ein Abdruck im Polymer, der auf verschiedene Weise weiterverarbeitet werden kann (ätzen oder als funktionale Polymerschicht beibehalten). Auch beim Inking geht man von einem Stempel aus. Auf diesen wird das Polymer aufgetragen und auf dem Substrat positioniert. Es bildet sich ein „self-assembled monolayer“ (SAM) auf dem Substrat, der wiederum unterschiedlich weiterverarbeitet werden kann.

Die Einsatzbereiche der hier angeführten Lithographiemethoden werden unterschiedlich eingeschätzt, da die Kosten und der Durchsatz variieren. Nachteilig für die Verfahren ist die Tatsache, dass Größe, Reinigung, Positionierung und Lebensdauer des Stempels den Durchsatz erheblich beschränken. Weitere Herausforderungen resultieren aus den Erhitzungs- und Abkühlungszyklen beim Imprinting bzw. aus der Aufbringung und Diffusion der Tinte beim Inking.

Als besondere Schwierigkeit für Weich-Lithographieverfahren gilt die – in der Elektronik verbreitete – Fertigung von komplexen mehrlagigen Strukturen aus verschiedenen Materialien. Diese erfordern eine absolute Kongruenz und folglich eine äußerst präzise Ausrichtung der Stempel, die sich sehr problematisch gestaltet. Es wird darum weithin davon ausgegangen, dass sie in der Prozessorherstellung nicht mit den EUV- oder den Elektronenstrahlverfahren konkurrieren können werden. Weich-Lithographiemethoden sind aber interessante Methoden, um auf dünnen flexiblen (Polymer-)Folien so genannte polytronische Systeme (Miller 2001) zu realisieren. Diese finden z. B. große Anwendung als Smart Labels, intelligente Etiketten, die in der Logistik, Warenidentifikation und der Zugangskontrolle den Barcode ersetzen könnten. Polytronische Systeme haben auch ein erhebliches Potenzial als Basistechnologie für konsumnahe Anwendungen des Ubiquitous Computing.

2. Neue Bauelementekonzepte

Da sich bereits heute die physikalischen und herstellungstechnischen Grenzen der konventionellen Halbleitertechnik abzeichnen, sind die Unternehmen bestrebt, Produkte und Verfahren der Nanotechnologie zu entwickeln (ITRS 2001) und anzuwenden. Dafür gibt es mehrere technische Ansatzpunkte, die ihrerseits in enger Wechselbeziehung zueinander stehen. Zum einen werden durch Nanotechnologie über die Fortsetzung der herkömmlichen Mikroelektronik hinaus neue Materialen zur Verfügung gestellt, die sich für die Nutzung in elektronischen Bauelementen – aber nicht nur dort – zu eignen scheinen. Vor allem die Kohlenstoffnanoröhren und die so genannten Quantenpunkte sind originär nanotechnologische Strukturen, die entweder in bekannten Bauelementekonzepten Anwendung finden könnten oder auch völlig neue Bauelemente ermöglichen und deren Einsatz in verschiedensten Bereichen erforscht wird. Aber auch auf der Basis klassischer Materialien ermöglichen der Nanotechnologie zuzurechnende neue Verfahren eine Vielzahl von mehr oder weniger Erfolg versprechenden Ansätzen. Bei allen Ansätzen werden bestimmte, nur im Nanometerbereich auftretende Phänomene – vor allem quantenmechanische Effekte – für die Realisierung kleinerer, besserer und/oder schnellerer elektronischer Bauelemente ausgenutzt. Gleichzeitig wird bei den meisten Ansätzen versucht, an bestehende Techniklinien und Produktionsverfahren anzuknüpfen. Ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit erheben zu wollen, werden die wichtigsten dieser Ansätze im Folgenden näher beleuchtet.

2.1 Logikbausteine

2.1.1 Resonanztunnelelemente

Resonanztunnelelemente, d. h. Resonanz-Tunnel-Dioden (RTD) und Resonanz-Tunnel-Transistoren (RTT), stellen eine wichtige Brücke zwischen herkömmlichen Festkörper-Halbleiter-Bauelementen und den Quanteneffekt-Bauelementen dar. Resonanztunnelelemente werden normalerweise in konventioneller Festkörpertechnologie hergestellt. Da sie auch bei Raumtemperatur funktionieren, sind Resonanztunnelelemente die am besten etablierten nanoskaligen elektronischen Bauelemente.

Nähert man sich bei den Strukturgrößen eines Bauelements der so genannten de-Broglie-Wellenlänge[23], so verhalten sich die Elektronen nicht mehr wie Teilchen, sondern als Welle. Es treten charakteristische Eigenschaften wie Interferenz oder Tunneln auf. Beim Tunneln durchquert ein Elektron mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine eigentlich nicht leitende Schicht. Da bei Resonanztunnelelementen nur geringe Ladungsmengen transportiert werden, besitzen sie eine geringe Leistungsaufnahme und schnelle Schaltzeiten (bis zu 350 GHz). Ihre geringe Strukturgröße erlaubt eine höhere Integra-

[23] Die de-Broglie-Wellenlänge liegt für Elektronen in Silizium bei Raumtemperatur bei ca. 5 nm.

tionsdichte und somit die Fortsetzung des Moore'schen Gesetzes auch über die physikalisch-technische Grenze der Festkörperhalbleitertechnik hinaus.

Anders als bei herkömmlichen Festkörpertransistoren können Resonanztunnelelemente mehr als zwei Zustände (ein oder aus) besitzen (Goldhaber-Gordon et al. 1997). Dies ermöglicht u. a. die Konstruktion mehrwertiger Logikschaltungen mit weniger Bauteilen als funktionsgleiche zweiwertige Logikschaltungen. In Verbindung mit bestimmten (herkömmlichen) Transistorentypen lassen sich integrierte Schaltungen entwerfen, die mit weniger Bauteilen und weniger Verbindungen auskommen und dadurch eine höhere Leistung und geringere Kosten ermöglichen (Mazumder et al. 1998; van der Wagt 1999).

In den vergangenen Jahren sind eine ganze Reihe von Resonanztunnelelementen bis zur Produktionsreife entwickelt worden, die sowohl für Oszillatoren als auch für Logik- und Speicherschaltkreise verwendet werden (Compañó 2000). Trotzdem gibt es immer noch etliche Herausforderungen an die Forschung und Entwicklung. Dies betrifft vor allem die Herstellung gleichmäßig dicker Isolierschichten, von denen die Leistungsfähigkeit der Bauelemente entscheidend abhängt. Zudem muss – um eine Kompatibilität zu den Herstellungsprozessen von CMOS-Schaltkreisen herzustellen – eine Fertigung von Resonanztunnelelementen aus Silizium bzw. Silizium/Germanium umgesetzt werden. Dabei bestehen allerdings immer noch produktionstechnische Probleme, etwa bei der Herstellung der einkristallinen Insel zwischen den Isolierschichten (Goser/Pacha 1998; Seabaugh et al. 2000). Bis zur deren Lösung bleiben Resonanztunnelelemente nach Einschätzung von Experten, die vom FhG-ISI befragt wurden, Nischenprodukte.

2.1.2 Einzel-Elektronen-Transistoren

Transistoren, die nur ein Elektron zur Änderung ihres Schaltzustandes benötigen, sind schon lange Gegenstand intensiver Forschung mit verschiedenen Ansätzen. Diese Einzel-Elektronen-Transistoren (Single Electron Transistors, SETs) beruhen auf quantenmechanischen Prinzipien, hauptsächlich denen der Coulomb-Blockade, des Tunnelkontakts und der Coulomb-Insel (Quantenpunkt). Sie sind in ihrem Aufbau sehr klein und gelten als Nachfolger der herkömmlichen Festkörperhalbleitertechnologie, die bei diesen Strukturgrößen (< 20 nm) nicht mehr funktionsfähig ist. Zudem weisen SETs zwei entscheidende Merkmale auf, die eine hohe Integrationsdichte ermöglichen: Da – im Unterschied zu heutigen Transistoren – bei SET nur ein Elektron für den Schaltvorgang benötigt wird, wird weniger Leistung aufgenommen und somit auch weniger Wärme produziert, die abgeführt werden muss.

Ähnlich wie Resonanztunnelelemente besteht ein SET aus zwei Tunnelkontakten mit einer dazwischen liegenden Insel. Das Potenzial dieser Insel lässt sich durch eine Gateelektrode steuern. Damit ein weiteres Elektron von einer Elektrode auf die Insel tunneln kann, muss das Elektron – normalerweise durch Anlegen einer Spannung zwischen den Elektroden – die so genannte Coulomb-Blockade überwinden.[24] Darüber hinaus lassen sich durch Anlegen einer Spannung an die Gateelektrode das Potenzial der Insel und damit der Stromfluss variieren (Altmeyer et al. 1999; Hofmann/Spangenberg 2000).

Die Coulomb-Blockade tritt allerdings erst bei hinreichend kleiner Baugröße des SET, geringen Spannungen und niedrigen Temperaturen auf. Die Strukturgrößen dürfen bei Raumtemperatur nicht größer als 5 nm und bei 4,2 K[25] nicht größer als 50 nm sein. Die Erzeugung so kleiner Strukturen wird mit einer Reihe von unterschiedlichen Ansätzen verfolgt, bei denen momentan noch der prinzipielle Nachweis von Einzelelektroneneffekten im Vordergrund steht.

Das grundlegende Prinzip bei metallischen SETs ist die Realisierung einer dünnen Oxidschicht – deren Dicke die Dicke der Tunnelbarriere bestimmt – zwischen zwei überlappenden metallischen Leiterbahnen. Hierzu wurden im Labormaßstab mehrere Verfahren entwickelt. SETs aus Halbleitermaterialien, insbesondere aus Silizium, sind wegen ihrer Kompatibilität zur herkömmlichen CMOS-Technologie von besonderem Interesse. Bei einigen im Labor realisierten Ansätzen – etwa die Verwendung von ultradünnen Polysilizium-Schichten (Yano et al. 1995) oder von stark dotierten Siliziumstegen (Smith/Ahmed 1997) – ist die Verteilung der Tunnelkontakte in den nanoskaligen Stegen jedoch rein statistischer Natur, kann also nicht gezielt gesteuert werden, weshalb deren Überführung in technische Anwendungen wenig wahrscheinlich ist. Die einzige Möglichkeit, eine definierte Anzahl von Tunnelkontakten herzustellen, sind derzeit die so genannten Confinement-SETs. Die Fertigung der dafür notwendigen, nur wenige nanometerbreiten Verjüngung stellt jedoch extrem hohe Anforderungen an die Lithographieverfahren (Köster et al. 1999; Leobandung et al. 1995).

Auch der Einsatz von Kohlenstoffnanoröhren wird untersucht. So konnten an einer Anordnung unter Verwendung mehrwandiger Kohlenstoffnanoröhren Einzelelektroneneffekte beobachtet werden (Ahlskog et al. 2001). Andere Forschergruppen haben erfolgreich SETs realisiert, bei denen einwandige Kohlenstoffnanoröhren verwendet werden (Cui et al. 2002). Der Aufbau dieser SETs ist mit den Confinement-SETs vergleichbar, wobei die Kohlenstoffnanoröhre als Insel dient. Die technische Herausforderung liegt bei diesem Ansatz neben der Präparation geeigneter Kohlenstoffnanoröhren vor allem in der präzisen Herstellung von elektrischen Kontakten (Hofmann/Spangenberg 2000; INT 2001).

---

[24] Die Coulomb-Blockade beruht auf der Abstoßung gleichnamiger Ladungsträger auf der Insel. Die Coulomb-Kraft kann in nm-Strukturen so groß werden, dass die Präsenz eines einzelnen Elektrons an exponierter Stelle den Stromtransport durch einen ansonsten leitfähigen Kanal verhindert.

[25] 4,2 K (= – 268 °C): Temperatur von flüssigem Helium; 77 K (= – 195 °C): Temperatur von flüssigem Stickstoff

Die Forschung an Einzelelektronentransistoren ist heute noch reine Grundlagenforschung, die durch die spezifischen Vorteile solcher Bauelemente angetrieben wird. Neben einer Vielzahl von immer noch ungeklärten wissenschaftlichen Fragen sind auch die Produktionstechniken von einer industriellen Realisierung noch sehr weit entfernt. Insbesondere der für die Entwicklung praxistauglicher Systeme notwendige Betrieb bei Zimmertemperatur erscheint nicht bei allen Ansätzen erreichbar. Als Realisierungshorizont für praxistaugliche SET-Schaltkreise wird häufig das Jahr 2020 genannt. Eine vollständige Ablösung der herkömmlichen CMOS-Technologie durch Einzelelektronenschaltungen ist aber auch nach der Lösung der genannten Probleme nicht zu erwarten. Die von FhG-ISI befragten Experten gehen vielmehr davon aus, dass SETs zunächst eingebettet in konventionelle CMOS-Umgebungen genutzt werden.

2.1.3 Einzelflussquanten-Logik (RSFQ)

Die Einzelflussquanten-Logik (Rapid Single Flux Quantum Logic, RSFQ) basiert auf einem Quanteneffekt der Supraleitung, bei dem ein magnetisches Flussquantum zur Speicherung eines Bits genutzt wird. Das dazu verwendete Bauelement ist der so genannte Josephson-Kontakt (Bunyk et al. 2001). Da dieser Quanteneffekt bereits bei makroskopischen Strukturgrößen auftritt, sind nanoskalige Lithographieverfahren keine Voraussetzung für die Herstellung von RSFQ-Bauelementen. RSFQ ist die einzige heute bekannte Technologie, mit der Schaltkreise mit einer Geschwindigkeit von mehr als 100 GHz und einem Energieverlust von weniger als 1 µW pro Gate möglich erscheinen.

Da Supraleitung nur bei tiefen Temperaturen auftritt, müssen RSFQ-Bauelemente stets stark abgekühlt werden. Die Verfügbarkeit eines Kühlsystems, das die erforderlichen Anforderungen hinsichtlich Temperatur, Größe und Gewicht bei angemessenen Kosten erfüllt, ist das derzeit größte Hemmnis bei der Markteinführung von RSFQ-Bauelementen.

Aus herkömmlichen Tieftemperatursupraleitern mittels SIS-(Supraleiter-Isolator-Supraleiter-)Technologie gefertigte Schaltkreise mit einigen Tausend Josephson-Kontakten mit einer Größe von 3,5 µm und einer Geschwindigkeit bis zu 40 GHz können heute bereits im industriellen Maßstab hergestellt werden. Eine Verkleinerung der Strukturgrößen bis unter 100 nm scheint möglich. Solche Bauelemente müssen auf die Temperatur von flüssigem Helium gekühlt werden.

Der Einsatz von Hochtemperatursupraleitern besitzt – neben der höheren Betriebstemperatur – den Vorteil, dass die Schaltkreise mit einer höheren Taktrate (bis zu 500 GHz) betrieben werden können, wenn die Strukturgrößen bei etwa 500 nm (eine weitere Verkleinerung ist wegen der großen magnetische Eindringtiefe bei Supraleitern nicht möglich) liegen. Die hohen Schaltgeschwindigkeiten bieten die Möglichkeit für qualitativ neue Anwendungen, die sich allerdings durch die immer notwendige Kühlung auf Nischen beschränken werden. Mit Hochtemperatursupraleitern können derzeit nur einfache Schaltkreise realisiert werden, die bei einer Temperatur unter 50 K und mit einer Geschwindigkeit in der Größenordnung von 40 GHz betrieben werden können.

Grundsätzlich könnten RSFQ-Schaltkreise bis in den Terahertzbereich hinein betrieben werden. Für den Anwender ist aber weniger die interne Arbeitsgeschwindigkeit als die Geschwindigkeit von Ein- und Ausgabe von Bedeutung. Aus diesem Grunde spielt die Schaffung passender Schnittstellen zwischen RSFQ- und herkömmlichen Silizium-CMOS-Schaltkreisen eine wichtige Rolle, damit auch die Geschwindigkeit des Gesamtsystems von der Leistung der RSFQ-Logik profitieren kann.

Jenseits der technischen Probleme ist der Markt für Chips mit der Leistungsfähigkeit von RSFQ-Schaltkreisen, etwa für Höchstleistungsrechner, sehr begrenzt. Selbst in diesem Segment wird die Marktakzeptanz von der Verfügbarkeit kleiner, zuverlässiger und preiswerter Kühlaggregate abhängen. Im Bereich der Kryotechnik gibt es zwar erhebliche Fortschritte (Reiß et al. 2001), wegen des praktisch fehlenden Marktes für Hochleistungskühlgeräte fehlt es diesen Entwicklungen aber an der notwendigen Dynamik. Aus all diesen Gründen sind industrielle Investitionen zur Überführung von RSFQ in marktreife Produkte kurz- bis mittelfristig eher unwahrscheinlich.

2.1.4 Feldeffekttransistoren aus Kohlenstoffnanoröhren

Der Einsatz von Kohlenstoffnanoröhren (Carbon Nanotubes, CNT) als Transistorbauteil wird seit einiger Zeit intensiv diskutiert. Ihre intrinsischen Eigenschaften (geringer Durchmesser, metallischer bzw. halbleitender Charakter) prädestinieren sie als Quantenbauteil. Vorteilhaft sind die hohen Transportgeschwindigkeiten innerhalb der CNT, die einen Einsatz im Logikbereich ermöglichen. Die Herstellung eines Feldeffekttransistors (FET) mit einer halbleitenden Kohlenstoffnanoröhre als Kanal befindet sich in einem experimentellen Stadium (Tans et al. 1998). Die Kontaktierung von CNTs ist entscheidend für den Widerstandsbeiwert der Verbindung. Gute Verbindungen wurden mit Titan und Cobalt erreicht. Besonders die Herstellung von CNTs mit gewünschten Eigenschaften (Länge, Durchmesser und Verdrehung) und das Positionieren auf dem Substrat durch gezieltes Wachstum oder mittels Rasterkraftmikroskopie ist eine große Hürde. Herstellungsmethoden in dieser Form eignen sich aus heutiger Sicht nicht für die Produktion größerer Stückzahlen.

2.1.5 Magnetoelektronische Bauelemente – Spintronik

Grundlage der Magnetoelektronik sind die nur bei nanoskaligen Bauelementen auftretenden Magnetwiderstandseffekte. Damit eröffnet sich erstmals die kombinierte Nutzung von Spin und Ladung von Elektronen zur Realisierung von funktionalen Strukturen. Insbesondere

die Entdeckung des „gigantischen Magnetwiderstandseffekts“ (Giant Magneto Resistance, GMR) durch Grünberg und Fert im Jahre 1988 hat zu einer stark anwachsenden Forschungs- und Entwicklungsaktivität geführt, die in den 90er-Jahren zur Entdeckung weiterer Magnetwiderstandseffekte geführt hat (Grünberg 1995). Nach Experteneinschätzung besitzen diese zusammenfassend als xMR-Effekte bezeichneten Wirkprinzipien ein erhebliches Anwendungspotenzial, insbesondere im Bereich der Speichertechnik (s. u.) und der Sensorik (Mengel 1999).

Auch im Bereich der Informationsverarbeitung könnten künftige Technikgenerationen auf der gezielten Manipulation des Elektronenspins in einem Halbleiter basieren. Auf dem Weg dahin muss die Wissenschaft allerdings noch ein besseres Verständnis über die Bewegung polarisierter Elektronen im Halbleiter entwickeln und nach effektiven Verfahren zur Injektion von polarisierten Elektronenspins suchen, die eine Grundvoraussetzung für eine Spintronics auf atomarer Ebene darstellen. Eine Entwicklung in diese Richtung ist schon deswegen wichtig, weil sie – im Gegensatz zu Bauelementen auf Basis von Magnetwiderstandseffekten – auch die Möglichkeit zur Signalverstärkung eröffnet. Solche Bauelemente werden auch als Spintransistoren bezeichnet (Wolf et al. 2001).

Obwohl Spintransistoren klare Vorteile besitzen, sind viele Fragen hinsichtlich der Realisierung konkreter Bauelemente unbeantwortet. Die Forschungen auf dem Gebiet der Spintransistoren sind deshalb heute noch als reine Grundlagenforschung zu verstehen, bei der deutsche Akteure derzeit führende Rollen einnehmen. Eine Klärung der wichtigsten wissenschaftlichen Fragestellungen ist nach Expertenmeinung innerhalb von zehn bis 15 Jahren zu erwarten. Mit einer Überführung in industrielle Produkte ist – wenn überhaupt – nicht vor dem Jahr 2020 zu rechnen (Wolf et al. 2001). Heute noch nicht absehbare Synergien könnten sich aus einer dynamischen Entwicklung des Quanten-Computing ergeben, bei dem bestimmte Ansätze ebenfalls auf der Manipulation einzelner Elektronenspins basieren (Leuenberger/Loss 2001).

2.1.6 Molekulare Elektronik

In der molekularen Elektronik sind die Eigenschaften organischer bzw. biologischer Makromoleküle die Grundlage für die Realisierung bestimmter Funktionen bzw. Bauelemente. Ihr potenzielles Einsatzgebiet ist sehr vielfältig; insbesondere bei der biomolekularen Elektronik reicht es weit über den Bereich der Informations- und Kommunikationstechniken hinaus und wird voraussichtlich insbesondere dort seine Stärken ausspielen können, wo es auf die Möglichkeit der Ankopplung informationstechnischer und biologischer Systeme ankommt.

Prinzipiell wird eine ganze Reihe von Vorteilen bei der Nutzung von Makromolekülen als funktionelle Einheiten elektronischer Elemente gesehen (vgl. Reiß et al. 1994):

– Bei der molekularen Elektronik werden die einzelnen Funktionselemente auf Molekülebene synthetisiert. Dabei können die reichhaltigen Erfahrungen der Synthesechemie und der Biotechnologie genutzt werden.

– Gegenüber der herkömmlichen Mikroelektronik erzielt man durch den Einsatz von Molekülen eine sprunghafte Größenreduktion um zwei bis drei Größenordnungen. Bei Strukturgrößen von wenigen Nanometern scheinen insbesondere im Speicherbereich hohe Integrationsdichten möglich zu sein.

– Viele Makromoleküle haben eine dreidimensionale Struktur und erlauben somit prinzipiell auch die Erschließung der dritten Dimension für elektronische Bauelemente. Anorganische Bauelemente lassen sich dagegen nur mit sehr komplexen Fertigungsverfahren und dann auch nur mit vergleichsweise geringen Schichthöhen dreidimensional herstellen.

– Die potenziell erreichbare hohe Packungsdichte ist ein weiteres wesentliches Merkmal molekularer Strukturen. Integrierte Schaltkreise sind denkbar, die gegenüber solchen auf der Basis konventioneller Halbleitermaterialien um 10^6 bis 10^9 höhere Packungsdichten aufweisen.

– Die bei organischen Makromolekülen vielfach vorhandene Bistabilität kann die Basis für neuartige Schaltmechanismen bilden (vgl. auch Ellenbogen/Love 2000).

– Die bei organischen Makromolekülen mögliche Anisotropie, d. h. das verschiedenartige physikalisch-chemische Verhalten von Stoffen mit z. B. spiegelbildlich orientierten atomaren Anordnungen, könnte ohne komplizierte Fertigungstechnik zu entsprechenden Varianten von biomolekularen Strukturelementen führen.

Den hier skizzierten Vorteilen einer – bislang nur in Umrissen erkennbaren – molekularen Elektronik stehen aber auch eine Reihe von Nachteilen bzw. ungelösten Problemen gegenüber, die eine Überführung wissenschaftlicher Erkenntnisse in technisch relevante Produkte und Prozesse entgegenstehen (Reiß et al. 1994):

– Auch die molekulare Elektronik gehorcht den Regeln der Quantenstatistik. Dies bedeutet, dass ein Molekül zwischen verschiedenen Schaltzuständen ohne ersichtlichen Grund fluktuieren kann. Damit ist es prinzipiell unmöglich, den Zustand eines einzelnen Moleküls genau vorherzusagen. Nur für eine große Zahl von Molekülen sind Wahrscheinlichkeiten für entsprechende Schaltzustände angebbar. Durch diese Limitierung gerät man wieder in die Größenordnung konventioneller mikroelektronischer Schaltelemente.

– Aufgrund des quantenstatistischen Verhaltens einzelner Moleküle hängt es vom Zufall ab, in welchem Schaltzustand sich ein solches befindet. Dabei hängt die Wahrscheinlichkeit, sich in einem bestimmten Zustand zu befinden, von der Schaltgeschwindigkeit bzw. Schaltzeit ab. Daher werden manche Schalter bei ungenügender Signalfrequenz ihren Zustand nicht verändern. Durch geeignete fehlertolerante Architektu-

ren und Fehler korrigierende Algorithmen versucht man, dieser Schwäche zu begegnen.

– Schließlich stellt die Verknüpfung der molekularen Schaltelemente untereinander und mit der makroskopischen Peripherie immer noch eine erhebliche technische Herausforderung dar.

In der molekularen Elektronik unterscheidet man wenigstens vier Klassen von Bauelementen: elektrochemisch geschaltete Bauelemente, Bauelemente, die durch ein äußeres elektrisches Feld geschaltet werden und photoaktive bzw. photochrome Schaltelemente. Darüber hinaus gibt es elektromechanische molekulare Schaltelemente, auf die im Folgenden aber nicht näher eingegangen wird (vgl. dazu Goldhaber-Gordon et al. 1997; Lieber 2001).

Elektrochemisch geschaltete Bauelemente

Bereits 1974 wurde darüber spekuliert, ob einzelne Moleküle als elektrische Gleichrichter verwendet werden könnten. Der experimentelle Nachweis dieser Eigenschaft gelang Anfang der 1990er-Jahre. Nachdem mithilfe der Rastersondenmikroskopie die Untersuchung und gezielte Manipulation einzelner Moleküle möglich war, begann die Suche nach geeigneten Molekülen, die als elektronische Schaltelemente verwendet werden können. Diese Suche hat zwar mittlerweile erste positive Ergebnisse hervorgebracht, befindet sich aber immer noch ganz am Anfang (Goldhaber-Gordon et al. 1997).

Der für die Funktion verantwortliche Mechanismus kann sehr unterschiedlich sein. So kann durch die Anordnung elektrophiler und elektrophober Molekülgruppen eine Donor-Spacer-Akzeptor-Struktur geschaffen werden, durch die ein Gleichrichtereffekt erzeugt wird. Dafür wurden eine ganze Reihe von Molekülen vorgeschlagen, die durch Oxidation bzw. Reduktion ihre Leitfähigkeit verändern (z. B. Tetrathiafulvalene).

Feldgesteuerte Bauelemente

Eine der Grundideen der molekularen Nanoelektronik ist es, die Leitfähigkeit eines Moleküls durch ein äußeres elektrisches Feld zu steuern. So konnte beispielsweise ein Makromolekül hergestellt werden, das sich wie eine (festkörperphysikalische) Resonanztunneldiode (vgl. Kapitel VI.2.1.1) verhält (Goldhaber-Gordon et al. 1997). Solche molekularen Bauelemente sind 10- bis 100-mal kleiner als ihre Vorbilder in der Festkörpertechnologie.

Obwohl immer noch erhebliche Schwierigkeiten bei der Herstellung molekularer Resonanztunneldioden und -transistoren bestehen (vgl. Goldhaber-Gordon et al. 1997) sind Experten optimistisch, dass die Herstellung effizienter, durch ein äußeres elektrisches Feld gesteuerter molekularer Schaltelemente mittelfristig möglich sein wird (Hellemans/Moore 2001).

Photoaktive Elemente

Bakteriorhodopsin (BR), das in dem Bakterium Halobacterium salinarium vorkommt, ist das am besten erforschte Protein der Klasse der Rhodopsin-lichtempfindlichen Pigmente (Frydrich et al. 1998). BR ist ein integraler Baustein der bakteriellen Zellmembran, in der mehrere 10 000 BR-Moleküle eine zweidimensionale Matrix mit einem Durchmesser von einigen 100 Nanometern bilden. In den 90er-Jahren verschaffte sich das Bakteriorhodopsin in der Wissenschaft erhöhte Aufmerksamkeit, eine Reihe von Veröffentlichungen berichten über verschiedene Anwendungsmöglichkeiten in der Informationstechnik (Birge 1990; Hampp et al. 1992; Oesterhelt et al. 1991). Die Forschung konzentriert sich insbesondere auf die optoelektrischen Eigenschaften des BR und ihre Nutzung als Photosensoren.

Hampp (1993) beschreibt insbesondere drei Eigenschaften des BR, die für technische Anwendungen genutzt werden könnten. BR ist eine lichtgetriebene Protonenpumpe, die für die Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie Verwendung finden könnte. Die photoelektrischen Eigenschaften könnten außerdem für informationstechnische Zwecke eingesetzt werden. Und schließlich ist BR ein photochromes Protein, das bei Lichtabsorption reversibel seine Farbe von Purpur nach Gelb wechselt. Diese Eigenschaft ist für die optische Informationsverarbeitung von Interesse.

Seit Anfang der 90er-Jahre wird BR mit Erfolg gentechnisch modifiziert (Hampp et al. 1992). Durch den Austausch bestimmter funktionaler Aminosäuren lassen sich so die Sensitivität und Lebensdauer bestimmter Zustände des BR verändern und maßgeschneiderte Varianten für bestimmte informationstechnische Anwendungen erzeugen.

Selbstorganisation biologischer Makromoleküle

Insbesondere im Bereich der biomolekularen Elektronik bietet die Selbstorganisation eine Möglichkeit für die Darstellung von nanoskaligen Objekten (Winfree et al. 1998). DNA-Moleküle mit ihren dreidimensionalen Strukturen und ihren Fähigkeiten für intermolekulare Interaktionen erscheinen dabei besonders gut geeignet, um mit ihnen komplexe – zweidimensionale oder auch dreidimensionale – molekulare Objekte zu entwerfen und aufzubauen.

An ein Stützgerüst aus DNA ließen sich modifizierte Basen mit spezifischen Eigenschaften binden. Durch die Auswahl geeigneter chemischer Gruppen müssten sich Anwendungen in der Informations- und Kommunikationstechnik realisieren lassen (Lee 1998; Winfree et al. 1998). Kontrollierte Selbstorganisation ist natürlich nicht nur auf die DNA beschränkt, sondern gleichermaßen mit Proteinen und auch RNA durchführbar (Merkle 1999). Einige Proteine besitzen die Fähigkeit, Biomineralisation zu akkommodieren. Auf diesem Weg lassen sich mithilfe von Protein-Makromolekülen anorganische Nano-

strukturen herstellen, wie Kenji et al. (2001) zeigen konnten. Die Autoren verweisen insbesondere auf die Anwendungsmöglichkeit als nanometergroße elektronische Schaltkreise.

1999 stellte das Oak Ridge National Laboratory (ORNL 1999) Forschungsergebnisse vor, wonach die Proteine des Blattspinats – speziell das Photosynthese-Reaktionszentrum, das elektromagnetische Strahlung in chemische Energie transformiert – für Anwendungen im hochauflösenden Fernsehen, als ultraschnelle Schalter, logische Baugruppen und zur Solarenergieerzeugung genutzt werden könnten.

Es gibt derzeit keine konkreten Hinweise auf eine produktreife Anwendung. Vielmehr entsteht der Eindruck, dass sich die Forschungen noch sehr im Grundlagenbereich bewegen. Vereinzelte Hinweise deuten auf eine mittelfristige Realisierung von konkreten Produkten innerhalb der verschiedenen Entwicklungslinien hin.

Bewertung

Trotz der mehr als zwanzigjährigen Geschichte ist die molekulare Elektronik im Gegensatz zur festkörper- bzw. quantenphysikalischen Nanoelektronik bislang noch in der Phase der Grundlagenforschung. Insbesondere steht immer noch der experimentelle Nachweis für eine ganze Reihe von bislang nur postulierten Eigenschaften molekularer Systeme aus, der Voraussetzung für die Überführung in technische Innovationen ist. Dazu gehören der selbstorganisierte Aufbau komplexerer Systeme aus molekularen Funktionselementen und deren Verdrahtung mittels leitender molekularer Drähte, die Entwicklung synthesechemischer oder biotechnologischer Verfahren für die gezielte Erzeugung von Molekülen mit bestimmten Funktionen und eine effiziente, d. h. breitbandige Verschaltung biomolekularer Bauelemente.

Gerade bei der biomolekularen Elektronik macht sich bislang noch bemerkbar, dass die Nanoelektronik trotz der immer wieder betonten Interdisziplinarität der Nanotechnologie weitgehend von der physikalischen Forschung beherrscht wird. Dies hat seine Ursache nicht nur in den traditionell bestehenden Grenzen zwischen den physikalischen und lebenswissenschaftlichen Forschungstraditionen, sondern hat auch damit zu tun, dass in der Elektronikindustrie heutiger Prägung kaum Know-how aus den Bereichen der organischen Chemie und der Biotechnologie benötigt wird und damit auch nicht präsent ist. Industrielle Forschungsmittel fließen hauptsächlich in solche Forschungsprojekte, von denen erwartet wird, dass sie mit den vorhandenen personellen und materiellen Ressourcen sowie mit kalkulierbarem Risiko in absehbarer Zeit marktfähige Produkte hervorbringen.

Dies bedeutet gleichzeitig, dass Marktchancen für kleine und mittelständische Technologieunternehmen aus der Biotechnologiebranche bestehen. Diese könnten – eine weitere Förderung von Forschung im Bereich der molekularen Elektronik vorausgesetzt – existierende Nischenmärkte besetzen und von dort aus auch andere Marktsegmente bearbeiten. Nach Experteneinschätzung ist aber nicht damit zu rechnen, dass eine biologisch orientierte Elektronik die (ebenfalls sehr innovationsdynamische) physikalische Elektronik gänzlich ablösen könnte.

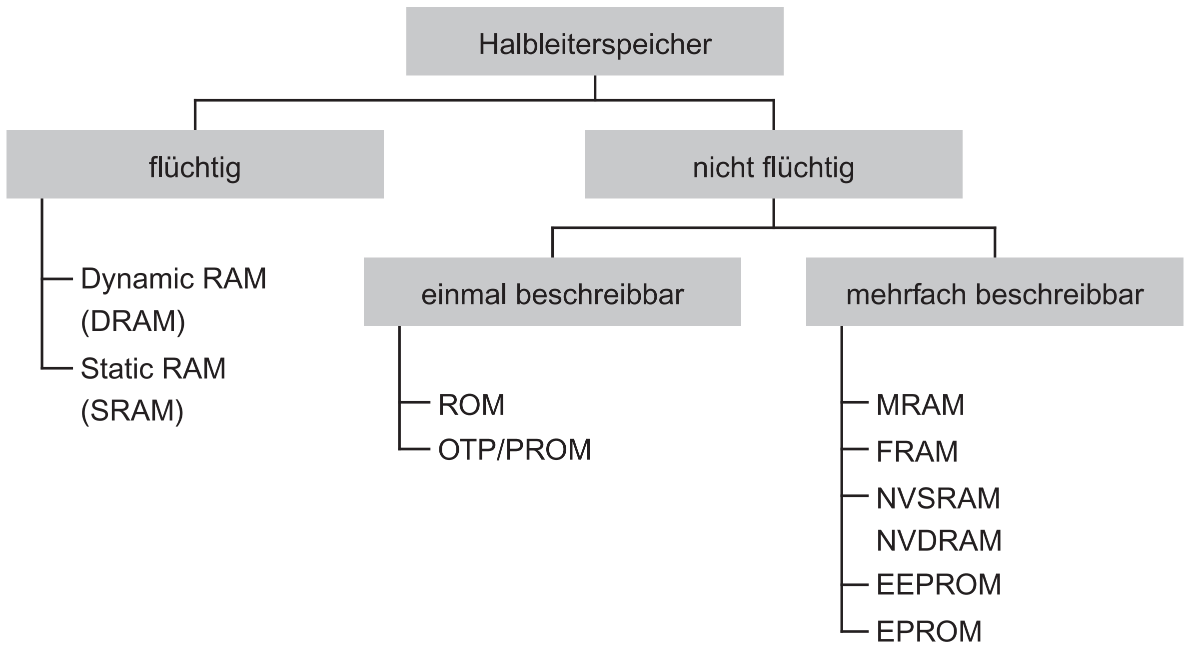
2.2 Speicherbauelemente

Speicherchips gehören neben Prozessoren zu den wichtigsten Massenprodukten auf dem Markt für Halbleiterbauelemente. Den Speichermarkt dominieren die DRAMs (Dynamic Random Access Memory) mit einem Marktanteil von fast 75 %. Die in CMOS-Technologie ausgeführten DRAMs und SRAMs haben den Hauptnachteil, dass sie so genannte flüchtige Speichertechniken sind. Der Speicherinhalt geht nach dem Abschalten verloren. Hinzu kommt bei DRAMs die Notwendigkeit der kontinuierlichen Datenauffrischung (refresh). Auf der anderen Seite ist die Herstellung von flüchtigen Halbleiterspeichern einer der am besten beherrschten industriellen Produktionsprozesse und die wichtigste treibende Kraft bei der Hochintegration von Schaltkreisen. Aus diesem Grund erwartet man, dass die Grenzen des herkömmlichen Top-down-Ansatzes zuerst bei Speicherchips erreicht werden.

Für die Zeit nach CMOS werden mehrere Entwicklungsideen verfolgt, die grundsätzlich verschiedene physikalische Prinzipien zur Informationsspeicherung nutzbar machen wollen. Ihnen gemeinsam ist das Ziel: nicht flüchtige und schnelle Speicher mit niedrigem Energieverbrauch und hoher Integrationsdichte bei möglichst geringen Kosten. Nachstehend werden einige Entwicklungen beschrieben, die diesbezügliche neue Ansätze nutzen, dabei aber weitgehend in die CMOS-Technologie integriert werden können.

Abbildung 20

Überblick über unterschiedliche Speicherfamilien



Quelle: FhG-ISI 2002b

2.2.1 Magnetische Speicherchips (MRAM)

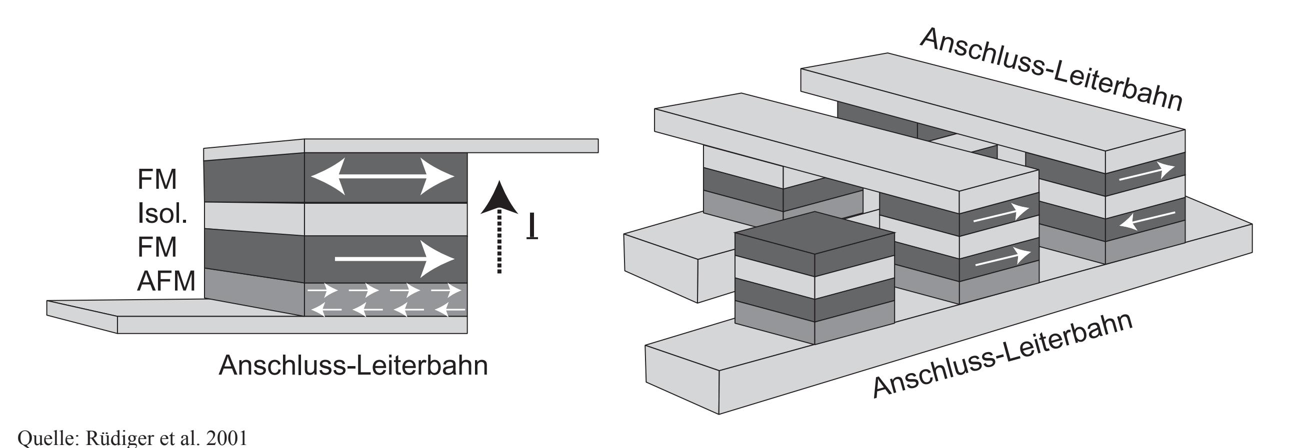
Magnetische Speicherelemente (Magnetic RAM, MRAM) stellen eine viel versprechende Alternative zu den klassischen DRAMs und SRAMs mit einem enorm hohen technischen wie wirtschaftlichen Potenzial (Güntherodt et al. 1999; Mengel 1999) dar.

Das Grundelement – eine MRAM-Zelle – ist ein Schichtsystem aus zwei dünnen ferromagnetischen Schichten (FM), die durch eine sehr dünne isolierende Schicht (Tunnelbarriere) voneinander getrennt sind (Abbildung 21).

Ist diese Zwischenlage dünn genug, so können Elektronen diese durch den quantenmechanischen Tunneleffekt überwinden, und es kann Strom durch den Kontakt fließen. Es stellt sich eine Abhängigkeit des elektrischen Tunnelwiderstands von der Magnetisierung der beiden ferromagnetischen Schichten ein: Bei antiparalleler Magnetisierung ist der Widerstand hoch, bei paralleler Magnetisierung niedrig. Diesen beiden Zuständen kann in der magnetischen Speichertechnik die logische 0 bzw. 1 zugeordnet werden. Die binäre Information wird also in Form der relativen Magnetisierungsausrichtung zweier durch eine Isolationsschicht getrennter ferromagnetischer

Abbildung 21

MRAM-Zelle bestehend aus einer magnetischen Tunnelbarriere (links) und mit Leiterbahnen vernetzte MRAM-Matrix (rechts)



Quelle: Rüdiger et al. 2001

Schichten gespeichert und durch eine einfache Widerstandsmessung ausgelesen, wobei in der Praxis die Magnetisierung der oberen Schicht durch ein äußeres Feld eingestellt wird, während die der unteren Schicht unveränderlich bleiben soll. Dieser Ansatz wird derzeit von zahlreichen wissenschaftlichen und industriellen Forschungsgruppen zur Realisierung von MRAMs genutzt. Prototypen wurden bereits vorgestellt (Wecker/Müller 2001).

Ein alternativer Realisierungsansatz für MRAM nutzt den GMR-Effekt. In einem einfachen Aufbau wird der GMR-Effekt bereits in serienmäßig gefertigten MRAMs von Honeywell für strahlungsfeste 16-Kbit-Speicher – insbesondere für militärische Anwendungen – eingesetzt. Weitere Testschaltungen unter Nutzung des GMR-Effekts liegen von Motorola und Honeywell vor (Johnson 2000). Es wird aber vielfach bezweifelt, dass sich GMR-basierte MRAMs im kommerziellen Bereich durchsetzen können (Cataldo 1999).

Insgesamt versprechen MRAMs eine gegenüber anderen nicht flüchtigen Speichern einen 1 000-mal schnelleren Schreibzugriff und einen deutlich niedrigeren Energieverbrauch. Mittelfristig kann sich MRAM wegen der deutlich kürzeren Zugriffszeiten und der fehlenden beweglichen Teile – zumindest für bestimmte Anwendungen – auch zu einer Alternative zu Festplattenspeichern entwickeln. Um die Speicherdichte von MRAMs konkurrenzfähig zu den derzeit erhältlichen DRAMs oder Festplatten zu gestalten, muss die laterale Größe einer MRAM-Zelle deutlich unter 100 nm liegen (Güntherodt et al. 1999; Wolf et al. 2001).

Bevor MRAMs in großem Maßstab auf den Markt gelangen können, müssen noch zahlreiche Hürden überwunden werden. Hierzu zählen neben der Reproduzierbarkeit der Zellen – insbesondere der nur 1 nm dicken Tunnelbarriere – in der Serienfertigung auch die Verringerung der benötigten Ströme zur Programmierung der Zellen und die weitergehende Miniaturisierung der Zellaufbauten bei einer weiteren Abnahme der Widerstandswerte der Schichtaufbauten (Compañó 2000). Mittlerweile beschäftigen sich weltweit fast alle führenden Halbleiterhersteller mit der Entwicklung von MRAMs.

2.2.2 Phasenwechselspeicher (OUM)

Einen anderes Speicherprinzip – die Umwandlung von der kristallinen zur amorphen Phase und umgekehrt, die auch schon bei wiederbeschreibbaren CDs und DVDs Verwendung findet – nutzt man bei Phasenwechselspeichern. Die nach dem Erfinder Stan Ovshinsky auch Ovonic Unified Memory (OUM) benannte Speichertechnik stammt bereits aus den 1960er-Jahren, konnte damals jedoch aufgrund von Materialproblemen nicht kommerziell verwertet werden.

In OUM-Zellen wird ein dünner Film aus Chalkogenid mittels kontrollierten Energieimpulsen (Wärme) zwischen dem kristallinen (leitenden) und amorphen (resistiven) Zustand hin- und hergeschaltet. Ausgelesen wird die Zelle durch eine Widerstandsmessung. Die potenziellen Vorteile des OUM liegen – neben der Nichtflüchtigkeit – in seiner leichten Integrierbarkeit in die CMOS-Technologie sowie seinem vergleichsweise schlichten technischen Ansatz, der auf der intelligenten Nutzung von Materialeigenschaften basiert und keine ausgefeilte Multischichtstruktur erfordert.

Deutlich werden seine Vorteile gegenüber den heute verbreiteten Flash-Speichern, die OUM zunächst ablösen sollen. Während ein Flash zuerst gelöscht und dann neu beschrieben werden muss, geschieht das Überschreiben von Daten in einem OUM in einem einzigen Schreibvorgang innerhalb von 50 Nanosekunden. Flash-Chips können zudem nur etwa eine Million Mal beschrieben werden, OUM hingegen eine Billion (10^{12}) Mal. Nicht zuletzt ist das Verfahren auch wegen seiner Kostenvorteile attraktiv. Intel, einer der größten Flash-Hersteller, engagiert sich stark für die OUM-Technologie. 2002 wurde ein 4-Megabit-Prototyp vorgestellt, mit der kommerziellen Einführung rechnet man in drei bis fünf Jahren.

2.2.3 Weitere Speichertechniken

Festplattenspeicher

Wie in keinem anderen Bereich der Informationstechnik und Kommunikationstechnik hat die Nanotechnologie bereits heute eine so große Reife und wirtschaftliche Bedeutung erlangt wie im Bereich der Plattenspeicher. Die Lösung noch bestehender wissenschaftlicher und technischer Probleme wird sowohl von Universitäten und Forschungseinrichtungen wie auch von der Industrie forciert. Hier besteht in den kommenden Jahren noch erheblicher Spielraum für technische Verbesserungen, bis die atomaren Grenzen der magnetischen Speichertechnik erreicht werden und auf alternative Technologien ausgewichen werden muss.

Die obere Grenze der Speicherdichte wird bei der magnetischen Aufzeichnung durch die so genannte superparamagnetische Grenze gesetzt. Die Speicherzellen auf der Magnetscheibenoberfläche bestehen aus vielen tausend elementaren Einzelmagneten. Deren Magnetisierung wird beim Schreiben in eine bestimmte Richtung gezwungen. Durch thermische Anregung kippen gelegentlich eine oder mehrere dieser magnetischen Zellen in die andere Richtung. Je kleiner also die Speicherzelle auf der Oberfläche einer Festplatte ist, desto größer ist das Risiko, dass diese ihre Magnetisierung und damit die gespeicherte Information verliert.

Diese physikalischen Vorgänge sind vom Material, der Temperatur, dem Herstellungsverfahren und den Bindemitteln abhängig. Damit ist die superparamagnetische Grenze keine feste physikalische Größe. Sie wurde bislang durch bessere Materialien und höherwertige Herstellungsverfahren immer weiter hinausgeschoben. So hat IBM im die Speicherdichte durch die Verwendung verbesserter Werkstoffe von 20 Gbit/in^2 (1999) auf heute etwa 50 Gbit/in^2 erhöht. Durch die Verwendung von antiferromagnetisch gekoppelten Speichermedien und den Übergang von der bislang longitudinalen zur senkrechten Magnetisierung der Speicheroberfläche erscheint bis

2005 eine weitere Erhöhung der Speicherdichte auf bis zu 100 bis 200 Gbit/in² möglich. Um einen weiteren Faktor 10 könnte die Speicherdichte steigen, wenn es gelänge, einzelne Weiß'sche Bezirke[26] für die Speicherung anzusprechen (Fullerton et al. 2000; Menon/Gupta 1999; Thompson/Best 2000).

Die Nutzung des GMR-Effekts macht kleinere und empfindlichere Sensoren, insbesondere Festplattenleseköpfe, möglich. Der größte Vorteil dieser so genannten GMR-Köpfe ist ihre größere Empfindlichkeit. Dadurch ist es möglich, die für die Speicherung eines Bits benötigte Fläche zu verkleinern und die Auslesegeschwindigkeit zu erhöhen und so bei gleich bleibender Baugröße von Festplatten immer größere Speicherkapazitäten zu realisieren. Die Grundlage hierfür wurde in den frühen 90er-Jahren durch Arbeiten bei IBM gelegt, die leistungsfähigere Materialkombinationen und geeignete Produktionsverfahren zum Ergebnis hatten. Die erste Festplatte mit GMR-Lesekopf wurde von IBM 1998 auf den Markt gebracht. Seither haben alle wichtigen Anbieter diese Technologie übernommen.

Neben der Verwendung für Festplatten haben GMR-Sensoren in den letzten fünf Jahren auch eine Vielzahl von weiteren Anwendungen gefunden. So hat der Bedarf an höherer Leistung, mehr Sicherheit und Komfort, höherer Energieeffizienz und geringerer Umweltbelastung zu einer starken Zunahme elektronischer Produkte in der Automatisierung und Sicherheitstechnik sowie im Automobil- und Maschinenbau geführt. Hier kommen in zunehmenden Maße GMR-Sensoren zum Einsatz. Für solche Anwendungen ist weniger die geringe Baugröße als vielmehr die Leistungsfähigkeit und Robustheit auch unter anspruchsvollen Bedingungen der Ausschlag gebende Faktor für den Einsatz magnetoelektronischer Sensoren. Gerade in der Sensorik und darauf aufbauenden Systemen besteht für Deutschland sowohl auf stückzahlenstarken Massenmärkten wie dem Automobilbau als auch bei hochspezialisierten Individuallösungen erhebliches wirtschaftliches Potenzial (Mengel 1999).

Nanomechanische Speicher

Ein nanomechanisches Speichersystem – von Funktionsprinzip her der klassischen Lochkarte vergleichbar – wurde am IBM Forschungslabor Zürich entwickelt. Bei dem unter den Namen Millipede (Tausendfüssler) bekannt gewordenen Verfahren werden mit Tausenden von feinsten Spitzen winzige Vertiefungen, die einzelne Bits repräsentieren, in einen dünnen Film aus Kunststoff geprägt.

Kern der Millipede-Technologie ist eine zweidimensionale Anordnung von v-förmigen Silizium-Federzungen (Kantilever), die 0,5 Mikrometer (Tausendstelmillimeter) dick und 70 Mikrometer lang sind. Am Ende jeder Zunge ragt auf einer Seite eine weniger als 2 Mikrometer hohe Spitze heraus. Der gegenwärtige experimentelle Aufbau enthält 1 024 Spitzen, deren Adressierung im Parallelbetrieb durch eine Zeitmultiplexingelektronik ermöglicht wird. Elektromagnetische Aktuation bewegt das Substrat mit dem Speichermedium auf dessen Oberfläche sehr präzise in x- und y-Richtung, sodass jede Spitze in ihrem Speicherfeld von 100 Mikrometer Seitenlänge lesen und schreiben kann. Mit dem experimentellen Chip mit 32 x 32 Spitzen auf einem Quadrat von 3 mm Seitenlänge wurde vorerst eine Speicherdichte von 200 Gigabits pro Quadratzoll und eine potenzielle Kapazität von etwa 0,5 Gigabytes erreicht; realisiert werden soll eine Speicherdichte im Bereich von Terabit pro Quadratzoll. Gearbeitet wird an der nächsten Generation, die viermal mehr Spitzen – 64 x 64 in einem Quadrat von 7 mm Seitenlänge – aufweisen wird.

Für die Funktionen des Gerätes, das heißt Lesen, Schreiben, Löschen und Überschreiben, werden die Spitzen mit dem nur wenige nanometerdünnen Polymerfilm auf dem Siliziumsubstrat in Kontakt gebracht. Das Schreiben von Bits erfolgt durch Aufheizen des in den Kantilever integrierten Widerstands auf typischerweise 400 °C. Die dadurch ebenfalls aufgeheizte Spitze weicht das Polymer auf, sinkt ein und hinterlässt eine Vertiefung mit einem Durchmesser von nur 10 Nanometern. Zum Lesen wird die Temperatur des Widerstands auf typischerweise 300 °C reduziert. Bei dieser Temperatur wird das Polymer nicht aufgeweicht. Fällt nun die Spitze in eine Vertiefung, kühlt sich der Widerstand wegen des besseren Wärmetransports leicht ab, was zu einer messbaren Veränderung des Widerstands führt. Um Daten zu überschreiben, ätzt die Spitze versetzt Vertiefungen in die Oberfläche. Deren äußere Ränder überlappen die alten Vertiefungen und löschen so die alten Daten. Mit mehr als 100 000 Schreib- und Überschreibzyklen sieht IBM den Nachweis erbracht, dass sich das Konzept für einen wiederbeschreibbaren Speichertyp eignet (IBM 2002).

3. Optoelektronik

Moderne Kommunikationstechnologien übertragen Informationen schon lange mit Licht statt mit elektrischem Strom. Für die Umwandlung von elektrischen in optische Signale – und zurück – finden optoelektronische Bauelemente Anwendung, beispielsweise in Leuchtdioden (LEDs), Halbleiterlasern oder Sensoren (z. B. Photodioden).

3.1 Quantenpunkte und darauf basierende Bauelemente

Quantenpunkte (Quantum Dots, QDs) sind Formationen aus höchstens wenigen tausend Atomen. Hergestellt werden sie z. B. mittels Molekularstrahl-Epitaxie (Molecular Beam Epitaxy, MBE), die eine gezielte Deposition von einzelnen Atomlagen erlaubt, mit lithographischen Methoden oder durch selbstorganisiertes Wachstum.

Quantenpunkte können für ein breites Spektrum von Anwendungen genutzt werden. Konkreten Einsatz finden sie bereits heute in Quantenpunktlasern. GaAs-basierte

[26] Weiß'sche Bezirke sind magnetische Domänen, innerhalb derer alle magnetischen Momente in einer Richtung ausgerichtet sind (Elementarmagnete).

Quantenpunktlaser, emittieren Licht mit einer Wellenlänge von etwa 1,3 µm, das an die Übertragungseigenschaften heutiger Glasfaser angepasst ist. Sie haben deshalb bereits heute große Relevanz für die Telekommunikation und können dort nach Expertenmeinung kurz bis mittelfristig erhebliche Marktanteile erreichen.

Während in herkömmlichen Halbleiterlasern die chemische Zusammensetzung des Materials die Emissionswellenlänge des Laserlichtes festlegt, ist diese bei Quantenpunktlasern von der Größe des Quantenpunktes abhängig. Die strukturelle Architektur ermöglicht somit eine gezielte Modifikation der elektronischen und damit auch der optischen Eigenschaften der einzelnen Quantenpunkte. Gelänge es in Zukunft, Quantenpunktlaser in den Grundfarben Rot, Grün und Blau – angepasst an das Farbdreieck und die Empfindlichkeit des menschlichen Auges – herzustellen, so könnten Bilder mit bisher nicht erreichter Farbreinheit elektronisch erzeugt werden.

Quantenpunkte eignen sich auch zur Realisierung von Einzelelektronenbauelementen, da sie als Ladungsspeicher in quantenmechanischen Bauelementen aufgefasst werden können, auf die geringste Ladungsmengen gebracht werden können.

Intensiv wird auch über neuartige Logikbauelemente wie zellulare Automaten aus gekoppelten Quantenpunkten (Quantum Cellular Automata, QCA) diskutiert. Entscheidende Faktoren für deren Realisierung sind die äußerst präzise Strukturierung und Anordnung der Quantenpunkte bzw. Zellen sowie der Betrieb bei Raumtemperatur. Die mit heutigen Verfahren herstellbaren Strukturgrößen erlauben einen Betrieb nur bei sehr tiefen Temperaturen (ca. 4 K) (Cole/Lusth 2001). Die Verschränkung von Elektronen eines Arrays auf Quantenpunkten könnte schließlich auch die Grundlage eines künftigen Quantencomputers darstellen.

3.2 Photonische Kristalle

Ein entscheidender Nachteil der bisherigen Optoelektronik ist, dass das Licht an den Netzknoten in elektrische Signale umgewandelt und dann eventuell wieder in Licht zurückgewandelt werden muss. Grund hierfür ist, dass es bislang keinen praktikablen Werkstoff für eine auf Licht statt elektrischem Strom basierende Elektronik – oder genauer Photonik – gibt.

Grundlage der künftigen Photonik sind so genannte photonische Kristalle – oder Photonic Band Gap (PBG)-Materialien –, die erstmals 1987 vorgeschlagen wurden (Yablonovitch 2002). Sie sind für Photonen das, was Halbleitermaterialien für Elektronen sind. Photonische Kristalle werden aus einem Dielektrikum hergestellt, das einen periodisch strukturierten Brechungsindex aufweist. Dadurch entsteht – analog der Bandlücke in Halbleitern – ein verbotener Bereich, die so genannte photonische Bandlücke.

Die Gitterkonstante solcher Kristalle liegt im Bereich der halben Wellenlänge des Lichts im Medium. Für sichtbares Licht bedeutet dies, dass bei der Herstellung eine Präzision im Bereich von 10 nm erforderlich ist. Verzichtet man gezielt lokal auf die periodische Strukturierung des Dielektrikums, kann man perfekte Wellenleiter erzeugen oder auch Resonatoren, in denen man Licht einfangen oder sogar aktiv speichern kann.

Zweidimensionale Strukturen dieser neuen Materialklasse werden heute schon mit sehr hoher Genauigkeit hergestellt, die Herstellung dreidimensionaler Strukturen befindet sich dagegen noch in den Anfängen. Die Verfügbarkeit von dreidimensionalen Strukturen in hoher Qualität würde ein großes Feld physikalischer Forschung in den Bereichen der nicht linearen Optik und Quantenoptik mit großem Anwendungspotenzial in den Informations- und Kommunikationstechniken eröffnen.

Denkbar ist beispielsweise die Nutzung photonischer Kristalle für Leuchtdioden und Laser. Sogar der Entwurf von photonischen Logiken für die Computertechnik erscheint – zumindest theoretisch – machbar. Von der Realisierung eines photonischen Transistors ist man allerdings nach Expertenmeinung noch Lichtjahre entfernt (Yablonovitch 2002).

4. Displaytechniken

IuK-Technologien und insbesondere audiovisuelle Medien brauchen vor allem eines: Bildschirme. Neueste Untersuchungen haben ergeben, dass allein in Deutschland momentan fast 55 Mio. Fernseher und über 20 Mio. Computer installiert sind, die mit einem Display ausgestattet sind (Cremer et al. 2003). Dies deutet an, dass es sich beim Markt für neue Displaytechnologien um einen Markt mit riesigem Potenzial handelt. Luther et al. (2002) schätzen allein das Marktvolumen für Flachdisplays bereits für das Jahr 2002 auf 31 Mrd. US-Dollar.

4.1 Organische Leuchtdioden (OLED)

Eine der wichtigsten zukünftigen Displaytechniken basiert auf organischen Leuchtdioden (Organic Light Emitting Diodes, OLEDs). 1979 entdeckte der Kodak-Wissenschaftler Chin Tang während seiner Arbeiten mit Solarzellen ein blaues Abstrahlen des verwendeten organischen Materials. Acht Jahre später konnte er mit seinem Kollegen van Slyke erstmals Elektrolumineszenz an sehr dünnen organischen Multischichten bei niedrigen Einsatzspannungen von unter 10 Volt aufzeigen. Dies forcierte eine weltweite intensive Forschung, die 1990 zur Entdeckung der Elektrolumineszenz in Polymeren und innerhalb von zehn Jahren zu ersten Anwendungen führte. Heute arbeiten Entwickler aller wichtigen Elektronikunternehmen sowie eine ganze Reihe von jungen Technologieunternehmen an der Entwicklung von OLED-Displays, deren Anwendungsspektrum vom Fernseher bis neuartigen mobilen IuK-Endgeräten reichen wird. Aus Deutschland sind insbesondere Siemens bzw. Infineon, Schott und Osram Semiconductors sowie das Startup-Unternehmen Covion Organic Semiconductors die wichtigsten Akteure in diesem Technologiefeld.

Eine prototypische OLED besteht aus wenigen Schichten, die in aufwendigen Verfahren übereinander aufgebracht werden. Für die Auswahl des Substrats existieren vielfäl-

tige Optionen, sie sind maßgeblich durch den späteren Einsatzzweck des Displays bestimmt. So können neben einer starren Trägersubstanz wie Glas auch flexible und durchsichtige Materialien, etwa aus Polyethylen, verwendet werden. Auf das Substrat werden mehrere Schichten aus unterschiedlichen Materialien aufgebracht, die als Kathode bzw. Anode oder als Transportschichten für Ladungsträger dienen. Die eigentlich Licht emittierende Schicht besteht aus einem organischen Material und ist nur wenige 10 nm dick. Die Auswahl des Materials bestimmt die Leuchtfarbe der OLEDs.

Für die Fertigung des Schichtaufbaus werden zwei verschiedene Strategien verfolgt. Kodak setzt bei der Herstellung ihrer so genannten Small Molecule OLEDs auf eine Technik, bei der die organischen Schichten in Vakuumatmosphäre auf das Trägermaterial aufgedampft werden. Ein von der Cambridge Display Technology entwickeltes Verfahren (PolymerLED) verfolgt einen etwas anderen Ansatz, bei dem das in Flüssigkeit gelöste organische Material durch Spin-Coating oder eine Art Tintenstrahldruck aufgebracht werden. Beide Verfahren sind noch relativ teuer und etwa 95 % der organischen Substanz geht während des Prozesses verloren. Displays aus PolymerLEDs sind hinsichtlich der Bildqualität heute noch etwas schlechter als solche aus Small Molecule OLEDs, versprechen aber deutlich geringere Fertigungskosten in der Massenproduktion (Niesing 2002).

Zur Herstellung vollfarbiger Displays werden verschiedene Ansätze verfolgt, die auch vom Herstellungsverfahren abhängig sind. In einem Pixel können die OLEDs für die Grundfarben nebeneinander oder gestapelt platziert werden. Dabei kommen Schattenwurfmasken zum Einsatz. Ausgehend von blauen OLEDs können die RGB-Farben durch Abwärtskonversion erzeugt werden. Umgekehrt ist es möglich, aus dem Licht weißer OLEDs durch Bandpassfilter oder di-elektrische Spiegel die drei Grundfarben zu erzeugen (Le Barny et al. 2000).

Obwohl das prinzipielle Verfahren weit entwickelt ist und bereits erste Produkte auf dem Markt angeboten werden, hat die OLED-Technologie immer noch mit einigen Kinderkrankheiten zu kämpfen. So verliert das für die Farbe Blau verwendete Polymer (Polyfluoren) durch Alterung bereits nach kurzer Zeit seine Leuchtkraft. Sämtliche leuchtenden Polymere dürfen weder mit Wasser noch mit Luftsauerstoff in Berührung kommen, da sich sonst ihre Leuchtkraft verschlechtert. Aus diesem Grunde wurden die OLEDs bisher überwiegend hinter Glas verkapselt. Für flexible Displays wird derzeit an Verfahren zum Aufbau von OLEDs auf PET-Folien gearbeitet. Insgesamt stellen OLEDs sehr hohe Anforderungen an die Synthese der Grundmaterialen, insbesondere an die Strukturreinheit und die Abwesenheit von Fremdstoffen.

Die Verdrahtung von OLED-Displays erfolgt heute noch auf herkömmliche Weise. Dies hat zur Folge, dass neben dem eigentlichen Display eine zusätzliche Platine mit der Ansteuerungselektronik benötigt wird. Es wird aber daran gearbeitet, auch diese Ansteuerelektronik mithilfe halbleitender Kunststoffe zu realisieren. Auf diese Weise sollte es möglich sein, die komplette Steuerelektronik des Displays und langfristig sogar einen ganzen Computer auf der Rückseite der gleichen Folie aufzubringen, auf der auch das OLED-Display aufgebaut ist. So könnten langfristig flexible Computer mit einer Dicke von nur wenigen Millimetern realisierbar werden.

Insgesamt haben OLED-Displays gegenüber herkömmlichen Bildschirmen eine ganze Reihe von Vorteilen. Sie sind selbstleuchtend, brauchen also keine Hintergrundbeleuchtung. Deswegen haben OLED-Displays schon heute eine deutlich geringere Einbautiefe als herkömmliche Flachbildschirme. Sie bieten aus einem sehr großen Blickwinkel (bis zu 170 Grad) ein gleichmäßig brillantes Bild, und eignen sich wegen der schnellen Schaltzeiten und des geringen Nachleuchtens auch für die Darstellung von Filmen und anderen Multimediainhalten. OLED-Displays verbrauchen deutlich weniger Energie und lassen sich in hauchdünnen Schichten auf beliebig große Flächen auftragen. Dadurch lassen sich sowohl aufrollbare als auch wandgroße Displays realisieren.

Die aufgeführten Eigenschaften lassen eine Vielzahl von verschiedenen Anwendungen im Displaybereich möglich erscheinen. Die geringe Leistungsaufnahme und geringe Einbautiefe prädestinieren sie für einen Einsatz in allen mobilen Kommunikationsgeräten wie Handy oder PDA. OLED-Kleindisplays haben schon vor einiger Zeit Serienreife erlangt, die meisten Hersteller von Mobiltelefonen bzw. deren Zulieferer sind bei deren Entwicklung und Nutzung aktiv.

Flexible Displays aus mikrometerdünner Folie könnten aufgewickelt liegen und bei Bedarf ausgerollt werden. Auf diese Weise ließe sich beispielsweise eine leichte, drahtlos übermittelte und dadurch hochaktuelle elektronische Zeitung realisieren, die heutigen Verfahren des elektronischen Papiers Konkurrenz machen. Außerdem sind solche Displays ein Kernelement von allgegenwärtigen informationstechnischen Systemen. Auch die Entwicklung neuer und leichterer brillenartig tragbarer Head-Mounted-Displays, die etwa für Visualisierungen in der Architektur und Medizin, für Fernwartung und Prozesskontrolle oder Navigations- und Flugleitsysteme genutzt werden, ist mithilfe der OLEDs möglich.

4.2 Feldemissionsdisplays aus Nanoröhren

Die Herstellung flacher und Energie sparender Displays erscheint auch auf der Basis von Kohlenstoffnanoröhren möglich. Nanoröhren haben bei Raumtemperatur eine mit Metallen vergleichbare Leitfähigkeit. Wird eine Spannung an sie angelegt, emittieren sie aufgrund ihres geringen Durchmessers sehr effektiv Elektronen. Nanoröhrendisplays nutzen diesen Mechanismus in Feldemissionsdisplays (FED), die in ihrer Funktionsweise herkömmlichen Kathodenstrahlröhren ähneln. Unter Feldemission versteht man den Austritt von Elektronen aus einem elektrischen Leiter ins Vakuum in Gegenwart einer geeignet hohen Feldstärke. Erste diesbezügliche Experimente datieren auf das Jahr 1995.

1998 wurden von der japanischen Firma ISE Electronics ein erstes einfaches Display und ein Beleuchtungselement

vorgestellt. In den vergangenen vier Jahren wurde intensiv an der Herstellung von homogenen Arrays aus Nanoröhren geforscht und erste Demonstratoren vorgestellt (Bonard et al. 2001).

Die hohe Prozesstemperatur hat bisher einen breiten Einsatz von einwandigen Nanoröhren verhindert. Cho et al. (2001) haben eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, bei niedrigen Temperaturen Arrays aus einwandigen Nanoröhren durch Photolithographie zu erzeugen. Wenn die noch bestehenden Probleme bei der Versiegelung der Displays und der Lebensdauer der Phosphorschicht gelöst sind, erscheinen hochauflösende Displays mit Feldemittern aus Kohlenstoffnanoröhren mittelfristig realisierbar zu sein.

Nach Einschätzung von Fachleuten ist die Entwicklung von Feldemissionsdisplays angesichts der Fortschritte bei den OLEDs etwas in den Hintergrund getreten, wichtige Pioniere in diesem Feld (z. B. Motorola) haben ihre Aktivitäten sogar ganz eingestellt. Diese Entwicklung ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass FEDs ursprünglich die Lücke zwischen den relativ kleinen LCD-Displays und den sehr großen Plasmadisplays schließen sollten. Insbesondere durch die Fortschritte bei den LCD-Displays ist diese Lücke mittlerweile aber deutlich kleiner geworden (Pribat 2002).

Darüber hinaus sind FEDs auf der Basis von Kohlenstoffnanoröhren noch nicht über den Status der Grundlagenforschung hinaus. Eine Marktreife ist innerhalb der nächsten fünf Jahre kaum zu erwarten. Inwieweit sich FEDs dann gegen alternative, heute bereits sehr viel weiter entwickelte Technologien wie OLED-Displays werden durchsetzen können, bleibt unsicher.

5. Nanotechnologiebasierte Systeme und neue Architekturen

In den Kapiteln 2 bis 4 wurde vor allem der Frage nachgegangen, welche Entwicklungen bei den für Anwendungen der Informations- und Kommunikationstechnik benötigten Bauelementen mit dem Übergang in die Welt der Nanotechnologie zu beobachten sind. Um von den Bauelementen zu Systemen der Informations- und Kommunikationstechnik zu gelangen, werden die einzelnen Elemente nach einem bestimmten Funktionsbauplan – einer Architektur – zusammengefügt.

Es wurde bereits geschildert, dass viele der in der Forschung und Entwicklung befindlichen nanoelektronischen Bauelemente Funktionen ausführen, die heute von Transistoren, Schalt- und Speicherelementen ausgeführt werden, nur dass diese Nano-Bauteile um ein Vielfaches kleiner sind. In diesem Sinne ist es möglich, nicht nur mit der Nano-CMOS-Technologie, sondern auch mit Bauelementen der Quantenelektronik, wie RSFQ-, Resonanztunneldioden bzw. -transistoren oder Einzelelektronentransistoren, herkömmliche informations- und telekommunikationstechnische Anwendungssysteme aufzubauen. Der Übergang von der traditionellen zur Nanoelektronik hat also nicht notwendigerweise auch einen Paradigmenwechsel bei der Architektur von Anwendungssystemen zur Folge.

Obwohl sich die Nanoelektronik in diesem Sinne grundsätzlich nahtlos in Anwendungssysteme überführen lässt, treten beim Aufbau von Schaltkreisen und Systemen dennoch eine ganze Reihe von praktischen Problemen auf (vgl. Compañó 2000 et al.; ITRS 2001). So ist beispielsweise der effiziente Entwurf von Schaltungen und Systemen von der Existenz leistungsfähiger Entwurfswerkzeuge abhängig. Hier gibt es bereits heute eine Produktivitätslücke, da die Entwicklungsproduktivität jährlich um rund 21 %, die Integrationsdichte aber sogar um 68 % ansteigt. Selbst wenn die grundlegenden wissenschaftlichen und produktionstechnischen Probleme gelöst werden können, muss dieser Flaschenhals beim Entwurf beseitigt werden, damit Nanoelektronik langfristig auch ökonomisch erfolgreich wird (Hamilton 1999). Ein weiteres Beispiel ist die Notwendigkeit zur Entwicklung fehlertoleranter Architekturen. Dies ist notwendig, da man sich beim Übergang zu quantenelektronischen Bauelementen von einem deterministischen Zuverlässigkeitsbegriff trennen muss. Quantenphysikalische Vorgänge sind grundsätzlich statistischer Natur, sodass Fehler immer vorkommen können. Hier sind in den vergangenen Jahren bereits diverse Ansätze entwickelt worden, wobei auf industrieller Seite vor allem Hewlett-Packard die Vorreiterrolle übernommen hat (Heath et al. 1998; Mange et al. 2002).

In Anbetracht der für Hightechprodukte bekannten langen und teuren Entwicklungszeiten wird es als dringende Aufgabe betrachtet, rechtzeitig nach alternativen Rechnerkonzepten zu suchen. Besonders interessant sind hier vor allem solche Architekturen, die sich die besonderen Eigenschaften der Nanotechnologie zu Nutzen machen, um Funktionalitäten der Telekommunikation und insbesondere der Informationsverarbeitung auf völlig neue Weise zu realisieren. Diese Ansätze reichen von der eher konventionellen Parallelverarbeitung über Verfahren des Soft Computing (z. B. künstliche neuronale Netze) bis zu den im Folgenden erläuterten Ansätzen des DNA- und Quanten-Computing. Diese haben mit herkömmlichen Architekturen nichts mehr gemeinsam, sie realisieren Datenverarbeitungsfunktionen auf molekularer Ebene, wobei beim DNA-Computing biochemische und beim Quantencomputer quantenphysikalische Eigenschaften genutzt werden. Für beide Ansätze ist daher ein gewisser Entwicklungsstand im Bereich der Nanotechnologie unabdingbar. Deshalb befinden sie sich – trotz einer teilweise langen theoretischen Vorgeschichte – noch in ihren ersten Anfängen.

5.1 DNA-Computing

Erste praktische Arbeiten zum Rechnen mit DNA wurden in den 90er-Jahren durchgeführt. Sie inspirierten seitdem eine ganze Reihe von theoretischen Forschungsarbeiten, in denen Rechnermodelle mit DNA vorgeschlagen und teilweise auch experimentell ausgeführt wurden. Das entscheidende Interesse war und ist, mithilfe von großen

Mengen DNA in kleinen Volumina eine hohe Parallelität der Berechnung erzielen zu können.

Bereiche, die schon heute als vielversprechend erkannt sind, sind die Suchprobleme, für die dann auch die meisten bisherigen DNA-Rechner-Modelle entwickelt wurden.

Andere Ansätze konzentrieren sich auf die Rolle der DNA als Informationsträger und verzichten auf die Nachbildung logischer und arithmetischer Operationen oder Algorithmen. Beispiele hierfür sind das Markieren von Produkten oder die Steganographie (Leier et al. 2000). Eine entscheidende Rolle spielt hierbei die kontrollierte Erstellung von syntaktisch korrekten DNA-Ausdrücken. Dazu bedient man sich des Konzeptes der programmierten Selbstorganisation, bei der sich große Anzahlen solcher Ausdrücke von selbst bilden.

DNA-Computing

In einem DNA-Strang ist (Erb-)Information mittels der Abfolge der vier Basen A, C, G und T gespeichert. Dies macht man sich beim DNA-Computing zunutze. Rechenoperationen werden in einem DNA-Computer durch biochemische Prozesse wie das Zerschneiden, Kopieren, Zusammenfügen und Selektieren von DNA-Strängen realisiert. Die hierfür notwendigen Techniken und Werkzeuge (z. B. selektive Enzyme, PCR, Gel-Elektrophorese) sind in biochemischen Labors routinemäßig im Einsatz.

Leonard Adleman zeigte 1994 (Adleman 1994 u. 1996), dass man mit einem Reagenzglas voller DNA ein Standardproblem der Informatik – ein so genanntes Hamilton-Weg-Problem – lösen kann. Die Aufgabe bestand darin, in einem gegebenen Wegenetz mit sieben Städten einen Weg zu finden, der – beginnend in der Stadt 1 und endend in der Stadt 7 – alle Städte miteinander verbindet und keinen Wegabschnitt mehr als einmal benutzt (auch Problem des Handlungsreisenden genannt).

Jeder Strang in Adlemans DNA-Suppe repräsentierte eine der sieben Städte beziehungsweise einen der möglichen Verbindungswege, wobei ein Wegstrang die zwei dazugehörigen Stadtstränge miteinander verkleben konnte. Im Reagenzglas verbanden sich innerhalb von Sekunden die Stränge in allen denkbaren Kombinationen. Um die Lösung zu finden, entfernte Adleman zunächst alle Stränge, die zu lang oder zu kurz waren, die also mehr oder weniger als sieben Städte enthielten. Dann isolierte er alle Stränge, die mit der Stadt 1 begannen und mit Stadt 7 aufhörten. Nach einigen weiteren Schritten blieben nur noch die DNA-Stränge übrig, die die Lösung des Wegproblems repräsentierten. Dieser Prozess der Isolierung der richtigen Lösung aus dem Pool der Kombinationen dauerte etwa eine Woche.

Kritiker meinten anfänglich, dass ein DNA-Computer nur für solche Probleme geeignet wäre. Inzwischen haben aber mehrere Forscher gezeigt, dass ein solches Gerät im Prinzip all das berechnen könnte, was auch ein Standardcomputer kann.

Auf zwei Aspekte muss besonders geachtet werden, will man das DNA-Computing in der Praxis einsetzen: Erstens müssen Verfahren und Werkzeuge erforscht und entwickelt werden, die für einen größeren Anwendungsbereich nutzbar sind. Einzelfalllösungen sind für den praktischen Einsatz nicht geeignet. Zweitens gilt es, das Fehlerproblem in den Griff zu bekommen.

Die in der Berechnungsphase angewendeten Operatoren verwenden biotechnische Tools, wie die Vereinigung von DNA-Sequenzen mittels Hybridisierung, das Extrahieren bestimmter Sequenzen oder das Sortieren der Sequenzen über die so genannte Gel-Elektrophorese. Nicht völlig fehlerfrei arbeitet z. B. die Polymerase. Mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 10^{-5} bis 10^{-6} werden dabei falsche statt richtiger Basen eingefügt. Von größerer Tragweite sind jedoch Fehlhybridisierungen. Unter diesen versteht man Doppelstränge, die gemäß des zu berechnenden Algorithmus gar nicht entstehen dürften. Die Ursache liegt in der von der Natur offensichtlich durchaus so gewollten Möglichkeit von Hybriden, die sich aus untereinander nicht bis auf die letzte Base komplementären Einzelsträngen zusammensetzen können.

Es ist sicherlich eine technologische Herausforderung, die von der Evolution geschaffenen natürlichen Abläufe mit ihren inhärenten Fehlertoleranzen für die Zwecke des DNA-Computing weniger fehleranfällig ablaufen zu lassen. Dennoch bleibt es unumgänglich, die Implementierungen der Operatoren im Hinblick auf ihre Fehleranfälligkeit zu verbessern.

Folgende attraktive Eigenschaften eines DNA-Computers sind zu nennen (Kolo et al. 1999; Ruben/Landweber 2001):

- Hohe Speicherdichte: Ein Gramm DNA (entsprechend ca. 1 cm^3 Trockenmasse) enthält so viel Information wie eine Billion CDs.
- Massiv parallele Informationsverarbeitung: In Adlemans klassischem Experiment wurden in einem Tröpfchen DNA-Lösung annähernd 10^{14} DNA-Lösungsmöglichkeiten gleichzeitig innerhalb von etwa einer Sekunde verkettet.
- Energieeffizienz: Molekulare Computer sind – zumindest theoretisch – äußerst energieeffizient. Prinzipiell ist ein Joule für ungefähr 2×10^{19} DNA-Verknüpfungsoperationen ausreichend. Vor dem Hintergrund der durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik überhaupt nur möglichen irreversiblen elementaren 34×10^{19} Operationen pro Joule und bei Zimmertemperatur, ist dies eine bestechend hohe Zahl. Sie ist insbesondere auch deshalb bemerkenswert, wenn man bedenkt, dass bestehende Supercomputer gerade 10^9 Operationen pro Joule erreichen.

Diesen – zumindest theoretischen – Vorteilen, stehen eine ganze Reihe von teilweise schwerwiegenden Nachteilen bzw. ungelösten Problemen gegenüber, denn

- die große Rechenkraft des DNA-Computing ist auf eine kleine Zahl von Operationen beschränkt. Viele andere Operationen der Berechnungsphase sind

dagegen sehr zeitaufwendig. Darüber hinaus sind die Ein- und Ausgabe, die Kodierung der Kandidaten in Sequenzen und das Auslesen der übrig gebliebenen Sequenzen sehr umständlich.

– Probleme, bei denen die Komplexität des Algorithmus, also die Anzahl der durchzuführenden Rechenoperationen, schneller als polynominal wächst (NP-Probleme), können auch durch DNA-Computing nicht grundsätzlich besser gelöst werden. Der exponenzielle Anstieg führt vielmehr relativ schnell an die praktische Grenzen des DNA-Computing. Für die Lösung eines Hamilton'schen Pfadproblems mit 70 Knoten oder Städten würde man ca. 10^{25} kg DNA benötigen. Dies entspricht annähernd der Erdmasse.

– Schließlich bleibt das schon erwähnte Problem der inhärenten Fehlerhaftigkeit von DNA-Rechenoperationen.

Im Hinblick auf die Anwendungspotenziale gibt es deshalb auch sehr unterschiedliche Einschätzungen. So besteht unter Experten die Vorstellung, dass die Zukunft des DNA-Computing nicht in der Lösung großer NP-Probleme liegt. Sie glauben vielmehr an einen Bedarf an vollorganischen Rechenanlagen, die sich in lebende Organismen implantieren lassen und dort Signale von verschiedenen körpereigenen Quellen integrieren sowie ein Ausgangssignal für die Steuerung von molekularen Liefereinheiten für Arzneien oder andere körperwichtige Substanzen berechnen (vgl. Benenson et al. 2001; Ogihara/Ray 2000). Von anderer Seite wird das DNA-Computing insbesondere als besonders geeignet für die Umsetzung evolutionärer Algorithmen betrachtet, deren Kernbestandteile (Population, Variation und Selektion) direkte Entsprechungen in der DNA-Technologie haben. Somit könnten wahrscheinlich mit DNA-Computern Genetic-Programming-Architekturen direkt umgesetzt werden.

Kiernan (1997) spricht eher von biomolekularer Rechnernutzung statt von DNA-Computing und glaubt, dass diese Maschinen zukünftig weniger zum Lösen von Algorithmen eingesetzt werden, sondern ihre größte Auswirkung wohl im Lesen und Entschlüsseln natürlicher DNA haben werden. Das Stichwort wäre in diesem Zusammenhang DNA-Fingerprinting bei der Aufklärung von Verbrechen oder anderen Ereignissen. Das DNA-Computing lässt sich freilich nicht nur für die Entschlüsselung biologischer Codes verwenden, sondern auch für Zwecke der Kryptographie bzw. Steganographie, wobei nur demjenigen die Entschlüsselung gelingt, der die passenden Schlüsselmoleküle kennt (vgl. Leier et al. 2000; Richter et al. 2000).

Insgesamt gibt es wegen der geschilderten Schwächen berechtigte Zweifel, ob DNA-Computer siliziumbasierten Rechnern oder anderen neuen Architekturkonzepten wie dem Quanten-Computing ernsthaft Konkurrenz machen können. Es wird jedoch Anwendungsbereiche geben, in denen die Nutzung von DNA durchaus sinnvoll und zweckmäßig ist, nämlich in Fällen, wo es gar nicht um das Schreiben und Ausführen von Programmen geht oder wo eine konkrete Ankopplung des Rechenvorgangs an chemische und biochemische Prozesse gewünscht wird. In diesen „computational niches" (Adleman 1996) können künftige DNA-Rechner die konventionellen Maschinen nach Expertenmeinung sinnvoll ergänzen.

5.2 Quanten-Computing

Weitere viel versprechende Alternativen zur konventionellen Computerarchitektur, die erst seit wenigen Jahren erforscht werden, sind die Quanteninformationstechniken. Nach Vorarbeiten in den 70er-Jahren war es wiederum Richard Feynman, der versuchte, ein (theoretisches) Modell zu entwickeln, wie man die Gesetze der Quantenmechanik für Berechnungen quantenphysikalischer Experimente nutzen könnte (Feynman 1982). David Deutsch erkannte 1985, dass ein Quantencomputer die gleichen Fähigkeiten wie ein herkömmlicher Computer hätte (Deutsch 1985). Nachdem die Quanteninformationsverarbeitung für einige Jahre auf theoretischer Ebene verblieb, bekam das Feld mit der Entwicklung erster Quantenalgorithmen durch Shor (1994) und vor allem durch die Möglichkeiten der Nanotechnologie zur Realisierung von geeigneten Experimentalanordnungen einen erheblichen Entwicklungsschub. Neben dem hier im Vordergrund stehenden Quantencomputer gehört auch die Quantenkommunikation zu den Quanteninformationstechniken (vgl. Böltau 1999).

Bei der herkömmlichen Computertechnik wie auch beim DNA-Computing wird jedes Bit durch eine physikalische Größe bzw. Basenfolge innerhalb des Computers gespeichert, sei es als Magnetisierung eines Weiß'schen Bezirks auf einer Festplatte oder als Ladung auf einem Kondensator in einem dynamischen RAM. Dabei werden bei jeder dieser physikalischen Größen Werte unterschieden, die für 0 oder 1 stehen. Die Größe des Speichers wächst also im gleichen Maße wie der Umfang der zu speichernden und zu verarbeitenden Information.

Die fundamentalen Informationseinheiten des Quantencomputers – die so genannten Quantum Bits oder Qubits – vermögen nicht nur in zwei Zuständen wie die klassische Kodierungseinheit bit, sondern auch in einer Überlagerung (Superposition) dieser beiden Zustände zu existieren. Dass ein Qubit in der Lage ist, die Zustände 0 und 1 gleichzeitig einzunehmen, gehört zu den Eigentümlichkeiten der Quantenwelt.

Die Überlagerung gemeinsamer Eigenschaften mehrerer Teilchen oder Qubits ist ein wesentliches Charakteristikum von Quantensystemen. Man spricht bei diesem Phänomen auch von Verschränkung der möglichen Quantenzustände. Die Verschränkung geht allerdings verloren, wenn die Teilchen einer Messung unterworfen werden. Solange die Teilchen verschränkt sind, muss jedes Ergebnis, welches das Resultat einer zukünftigen Messung sein könnte, in irgendeiner Art und Weise bereits in ihnen enthalten sein. Unterschiedliche Zustände sind also in einem Register verschränkter Qubits gleichzeitig real und können gleichzeitig verarbeitet werden. Dies wird als Quantenparallelismus bezeichnet und eröffnet die Möglichkeit

einer massiv parallelen Informationsverarbeitung durch einen Quantencomputer.

Die Verschränkung der Quantenzustände hat auch zur Folge, dass die Speicherkapazität eines Quantenregisters exponenziell mit der Zahl der Qubits zunimmt, während dieser Zusammenhang beim klassischen Computer nur linear ist. So können n Qubits im Superpositionszustand 2^n mögliche Zustände gleichzeitig annehmen. Mit 16 Qubits lassen sich als bereits 2^{16}, d. h. 65 536 Zahlen, abspeichern. Da die Quantenzustände meist auch noch gewichtet vorliegen und zusätzlich einen Phasenwinkel besitzen, ist der Informationsinhalt sogar noch größer. Trotz dieses riesigen Speichervolumens kann am Ende der Berechnung jeweils nur ein Wert ausgelesen werden, da die Messung die Superposition zerstört.

In einem traditionellen Computer wird die Information in einer Serie von Bits gespeichert, diese werden durch logische Gatter manipuliert und ergeben schließlich ein Berechnungsergebnis. In ähnlicher Weise werden auch die Qubits eines Quantencomputers durch eine Reihe von Gatteroperationen manipuliert. Die Zustände der Qubits können schließlich gemessen werden, um das Ergebnis der Berechnung auszulesen.

Zur Durchführung einer Berechnung sind auch beim Quantencomputer drei Schritte durchzuführen. Zunächst muss der Ausgangszustand präpariert werden, d. h. es müssen die das Problem beschreibenden Daten durch quantenmechanische Zustände der Qubits abgebildet werden. Die eigentliche Berechnung – also die Abarbeitung des Quantenalgorithmus – wird durch die Propagation des Anfangszustands durchgeführt, bei der bestimmte Quantenzustände verstärkt und andere abgeschwächt werden. Schließlich wird das Rechenergebnis durch eine Messung des Endzustands der Qubits ausgelesen.

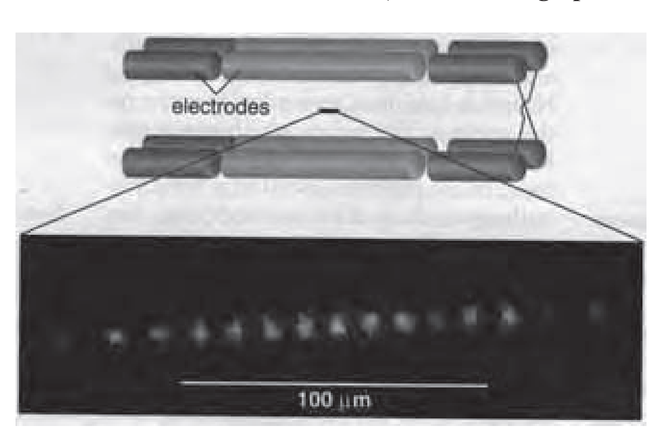
Quanten-Computing

Die kleinste Informationseinheit in einem klassischen Computer ist das Bit. Ein Bit befindet sich immer entweder im Zustand 0 oder im Zustand 1 (falsch oder wahr). Im Gegensatz dazu können sich in einem Quantenbit (Qubit) die beiden möglichen Zustände überlagern. Das Qubit befindet sich dann sowohl im Zustand 0 als auch im Zustand 1. Dies ist eine quantenphysikalische Eigenschaft, für die es kaum alltagsweltliche Analogien zur Veranschaulichung gibt. Es sind also in einem Qubit zwei Werte gleichzeitig speicherbar. Mit zwei Qubits kann man vier Werte (klassisch: 00, 01, 10, 11) simultan speichern, mit drei Qubits bereits acht. Die Speicherkapazität steigt somit exponenziell mit der Anzahl der Qubits an.

Eine Rechenoperation auf einer Anzahl (n) von Qubits wirkt also effektiv auf viele Werte (2^n) gleichzeitig. Das heißt ein Quantencomputer arbeitet massiv parallel. Nutzt man diese Eigenschaft mit geeigneten Rechenvorschriften (Algorithmen) aus, kann es gelingen, bestimmte Rechnungen in einem Bruchteil der Zeit auszuführen, in der dies mit einem herkömmlichen Computer möglich wäre. Erste Quantenalgorithmen wurden bereits entwickelt, z. B. für die Zerlegung großer Zahlen in ihre Faktoren (Shor 1994), eine Operation, die in der Kryptographie eine enorme Bedeutung hat.

Der Umsetzung des Quanten-Computing stehen allerdings noch große technische Probleme entgegen. Am weitesten fortgeschritten ist die Realisierung eines Qubit-Gatters in Form einer Anordnung von Ionen in einer Ionenfalle (so genannte Paul-Falle) im Vakuum. Rechenoperationen können z. B. durch die Wechselwirkung des Gatters mit Laserlicht programmiert werden.

Prinzip-Schema einer linearen Paul-Falle (unten: zwölf gespeicherte Ionen)



Quelle: www.qubit.org

Die parallel vorliegenden quantenmechanischen Zustände sind nicht unbedingt voneinander unabhängig, es ist also nicht selbstverständlich, dass die parallel vorliegenden physikalischen Zustände bei einer konkreten Berechnung auch alle benötigt werden. Hier gilt es, Algorithmen zu finden, die die Quantenparallelität geschickt nutzen (Rieffel/Polak 2000) und dadurch die Zahl der benötigten Rechenschritte drastisch reduzieren.

Für die große Klasse der Suchprobleme (in der Form „Suche ein x in der Menge der möglichen Lösungen, für die eine Bedingung P[x] erfüllt ist“) bietet der Quantencomputer bereits ohne die Entwicklung ausgefeilter Algorithmen erhebliche Vorteile. Dies hat nicht zuletzt für den als besonders wichtig betrachteten Bereich der Kryptographie erhebliche Konsequenzen. Bislang wurde hier die Asymmetrie zwischen Ver- und Entschlüsselung genutzt: Während der Aufwand zur Verschlüsselung linear von der Länge des verwendeten Schlüssels abhängt, nimmt der Aufwand zur Entschlüsselung so stark zu, dass schon bei relativ kurzen Schlüsseln praktisch keine Entschlüsselung mehr möglich ist. Bei der Verwendung von Quantenalgorithmen zur Faktorisierung würde diese Asymmetrie dramatisch verringern und bislang nicht brechbare Codes wären entschlüsselbar.

Obwohl deutlich weniger Rechenschritte benötigt werden, steigt der Rechenaufwand für unstrukturierte Probleme auch beim Quantencomputer exponenziell mit der Problemgröße an. Es wurde aber gezeigt, dass es wichtige, mit dem klassischen Computer nicht algorithmisch lösbare Problemklassen gibt, für die es sehr effiziente Quantenalgorithmen gibt. Für solche strukturierten Probleme nimmt der Rechenaufwand nochmals rapide ab (Steane 1998; Vedral/Plenio 1998). Die Entwicklung solcher effizienten Algorithmen hätte auch eine explizite ökonomische Bedeutung, da bislang nur mittels Näherungsverfahren optimierbare Prozesse besser berechenbar sind. Speziell für hochgradig korrelierte Daten, die z. B. für die Bilderkennung typisch sind, werden durch den Einsatz geeigneter Quantenalgorithmen erhebliche Vorteile erwartet.

Alle bislang dargestellten konzeptionellen Aspekte des Quanten-Computing haben nicht unmittelbar mit der Nanotechnologie zu tun, und tatsächlich stammen die ersten theoretischen Überlegungen aus einer Zeit, in der Manipulationen auf molekularer bzw. atomarer Ebene noch nicht realisierbar war. Deshalb dauerte es bis Mitte der 1990er-Jahre, bis die theoretisch bereits weit fortgeschrittenen Konzepte erstmals auch experimentell überprüft werden konnten. Seither haben sich eine ganze Reihe von Ansätzen entwickelt, wie ein Quantencomputer aufgebaut werden kann.

Zunächst gibt es eine ganze Reihe von physikalischen Größen, die sich für die Realisierung von Quantenbits eignen. Dazu gehören alle Eigenschaften auf molekularer oder atomarer Ebene, bei denen sich zwei (oder mehr) diskrete Zustände ausbilden. Neben Strahlteilermethoden eignen sich vor allem die Polarisierung von Photonen, der magnetische Spin von Elektronen oder Neutronen, die Energiezustände von Atomen sowie die bereits erläuterten Quantenpunkte. Ein quantenmechanisches Rechenwerk muss darüber hinaus drei grundsätzliche Anforderungen erfüllen (James 1998):

1. Zentral für die Berechnung eines Quantencomputers ist es, dass die Verschränkung der Quantenzustände während der gesamten Verarbeitungsdauer erhalten bleibt. Zerstört wird die Superposition nämlich nicht nur durch die Messung der Quantenzustände, sondern auch durch die unkontrollierte Wechselwirkung der Qubits mit ihrer Umgebung (Dekohärenz). Deshalb müssen Systeme zur Quanteninformationsverarbeitung gegen jegliche äußere Einwirkung abgeschirmt werden, um den Verschränkungszustand möglichst lange aufrecht zu erhalten. Aber selbst im Vakuum kann die so genannte Nullpunktenergie des elektromagnetischen Feldes ausreichen, die Verschränkung des Quantensystems zu zerstören.

2. Es muss die Verknüpfung der einzelnen logischen Operationen über eine Art Datenbus erlauben, wobei das Ergebnis jeder Operation wieder ein verschränkter Quantenzustand sein muss.

3. Das System muss das Auslesen des Quantenzustands erlauben.

Unter der Vielzahl der erprobten Anordnungen haben sich in den vergangenen Jahren vier als besonders erfolgversprechend herausgestellt: die Ionenfalle, die Kernspinresonanz, Josephson-Kontakte und Quantenpunkte. Bei der Ionenfalle handelt es sich um die heute am besten beherrschte Technik zur Realisierung von Quantencomputern, mit der mittlerweile die Verschränkung von fünf Qubits gelungen ist. Ein Quantencomputer nach dem Prinzip der Ionenfalle stellt jedoch hohe Anforderungen an das experimentelle Umfeld und ist daher wohl nur für Arbeiten im Labormaßstab geeignet.

Zu den viel versprechenden Techniken für die Realisierung eines Quantencomputers zählt momentan die Kernspinresonanz. Dabei werden NMR-Spektrometer verwendet, wie sie auch in der Chemie und Biologie zu Analysezwecken benutzt werden. Bei diesem Ansatz wird nicht ein einzelnes Quantenregister manipuliert, sondern jedes Molekül in einer flüssigen Probe fungiert als ein solches Register (Gershenfeld/Chuang 1998). Nachteilig dabei ist jedoch, das sich verfahrensbedingt mit wachsender Anzahl von Qubits das Signal-Rausch-Verhältnis exponenziell verschlechtert, wodurch die Skalierbarkeit eines (flüssigen) NMR-Quantencomputers erheblich begrenzt wird. Nach Expertenmeinung lassen sich so auf keinen Fall Quantencomputer mit mehr als 100 Qubits realisieren (Steane/Rieffel 2000). Für einen NMR-Computer, der nicht unter diesen Skalierungsproblemen leiden würde und außerdem mit einem weiter entwickelten Verfahren der Halbleitertechnik herzustellen wäre, wird deshalb ein Ansatz verfolgt, bei dem einzelne Phosphoratome in einen Festkörper implantiert und deren Kernspins durch außen angelegte Elektroden gesteuert werden. Auch hier gilt es zunächst erhebliche technische

Hürden bei der Herstellung der nur wenige Nanometer großen Qubits zu meistern, deren Schalteigenschaften extrem genau sein müssten, um für Quantenberechnung genutzt werden zu können (Kane 2000). Dennoch gilt die Kernspinresonanz momentan als der Ansatz zur Realisierung größerer Quantencomputer mit dem größten Potenzial. Es ist aber festzuhalten, dass es auf diesem Gebiet derzeit mehr Erwartungen und Hoffnungen als tatsächliche Ergebnisse gibt. Die laufenden Forschungsarbeiten gehören gegenwärtig noch vorwiegend zur Grundlagenforschung, eine technische Umsetzung ist erst langfristig zu erwarten.

Festkörperbasierte Konzepte für die Realisierung von Quantencomputern unter Verwendung von Josephson-Kontakten oder Quantenpunkten befinden sich noch in einem frühen experimentellen Stadium, teilweise konnten noch nicht einmal alle für einen Quantencomputer erforderlichen Eigenschaften nachgewiesen wurden. Da die Nutzung der Ionenfalle oder des NMR-Spektrometers für größere Quantengatter aber wenig praktikabel ist, kann angenommen werden, dass diese festkörperbasierten Konzepte die realistischsten Chancen auf eine technische Umsetzung haben. Darüber hinaus bietet die Nutzung von Festkörperstrukturen die Möglichkeit zur Nutzung bereits existierenden Produktions-Know-hows.

Zusammenfassend handelt es sich beim Quantencomputing um einen Bereich, der kurz- und mittelfristig erhebliches wissenschaftliches, mittel- und langfristig auch wirtschaftliches Potenzial besitzt. Mit den heute beherrschten drei bis fünf Quantenbits lassen sich nur wenige, sehr einfache Rechnungen durchführen. Richtig zum Tragen kämen die erheblichen Vorzüge des Quantencomputers allerdings erst bei sehr viel komplexeren Aufgaben, für die auf herkömmlichen Rechnern keine effizienten Lösungsalgorithmen existieren. Ein Computer, der solche Probleme in kurzer Zeit lösen kann, müsste Hunderte oder gar Tausende von Qubits haben. Ob und wann das unbestreitbare Potenzial des Quantencomputers technisch realisiert werden kann, ist noch offen; nach den Erfolgen der vergangenen Jahre scheinen Chancen hierfür durchaus zu bestehen. Allerdings müssen noch erhebliche Fortschritte bei der Herstellung von festkörperbasierten Qubits gemacht werden. Hier gilt es insbesondere die Probleme der Dekohärenz der Quantenzustände und das mit der Zahl der Qubits exponenziell schlechter werdende Signal-Rausch-Verhältnis zu lösen. Sie erfordern die Entwicklung spezieller Korrekturverfahren oder fehlertoleranter Architekturen (vgl. Preskill 1998). Man kann annehmen, dass ähnlich wie bei der Entwicklung des klassischen Computers mehrere Jahrzehnte zwischen den grundlegenden theoretischen Konzepten und marktreifen Produkten vergehen.

Auch wenn der universelle Quantencomputer als Fernziel noch weit in der Zukunft liegt, können Zwischenergebnisse auf dem Weg dorthin ebenfalls zu wichtigen Anwendungen führen. Hier ist beispielsweise die Quantenkryptographie zu nennen, für die nur ein einziges Qubit benötigt wird und bereits heute implementiert ist.

6. Anwendungsbeispiel: Allgegenwärtige informationstechnische Systeme

Der Topos der allgegenwärtigen Informationsverarbeitung (Ambient Intelligence, Ubiquitous Computing) beschreibt die Allgegenwärtigkeit von kleinsten, miteinander drahtlos vernetzten Computern. Entscheidend ist dabei, dass sie für den Anwender weitgehend unsichtbar in beliebige Alltagsgegenstände eingebaut (eingebettet) sind – wie schon heute in Haushaltsgeräten, Steuerungen und Leitsystemen – oder an diese angeheftet werden können. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, mithilfe von Sensoren die Umwelt eines Gegenstandes zu erfassen. Diese mit Informationsverarbeitungs- und Kommunikationsfähigkeiten ausgestatteten Gegenstände werden in die Lage versetzt zu wissen, wo sie sich befinden, welche anderen Gegenstände in der Nähe sind und was in der Vergangenheit mit ihnen geschah.

Wir befinden uns bereits mitten in diesem Trend „alles, immer, überall“. Das Internet wird mobil zugreifbar, und auf dem Markt tauchen immer mehr persönliche „information appliances“ wie drahtlos vernetzte PDAs, internetfähige Handys oder elektronische Bücher und Reiseführer auf. „Smart devices“ und die umfassende Informatisierung und Vernetzung fast beliebiger Dinge des Alltages werden in den kommenden Jahren aus technischer Sicht tatsächlich realisierbar. Die Tendenz geht weg vom PC und dem Computer als Werkzeug, hin zum „computing without computers“. Dabei soll der Mensch in unaufdringlicher Art bei seinen Arbeiten und Tätigkeiten unterstützt und von lästigen Routinearbeiten weitgehend befreit werden (Gershenfeld 1999; Weiser 1991).

Neue Entwicklungen in der Mikroelektronik und den Materialwissenschaften (z. B. Miniatursensoren, leuchtendes Plastik, elektronische Tinte) und Fortschritte der Kommunikationstechnik (insbesondere im drahtlosen Bereich) tragen dazu bei, dass es bald kleinste und spontan miteinander kommunizierende Rechner im Überfluss geben kann. In Form von nanoskaligen Bauelementen, neuartigen Werkstoffen (z. B. für Displays) oder bislang nicht realisierbaren Biosensoren ist die Nanotechnologie einer der entscheidenden Faktoren in dieser Entwicklung.

Die futuristisch-idealistisch erscheinende Vision des Ubiquitous Computing, bei der zur Verbesserung der Welt Alltagsdinge mit Kommunikations- und Informationsverarbeitungsfähigkeit angereichert und mit neuen Nutzungsschnittstellen ausgestattet werden, ist längst nicht so fern, wie es scheinen mag. Zukunftsstudien gehen von einer Realisierbarkeit wichtiger Aspekte bis zum Jahr 2010 aus (Ducatel et al. 2001; IST Advisory Group 2002).

6.1 Beiträge der Nanotechnologie zur technischen Basis allgegenwärtiger informationstechnischer Systeme

Die wichtigste technische Basis für die Entwicklung allgegenwärtiger informationstechnischer Systeme ist die halbleiterbasierte Elektronik. Durch permanentes Wachstum von Integrationsdichte und Leistungsfähigkeit von integrierten Schaltkreisen bei gleichzeitig sinkenden

spezifischen Kosten (Moore'sches Gesetz, s. o.) wurden Mikroprozessoren über die Jahre so billig und massenhaft herstellbar, dass sie heute nicht nur in Computern, sondern praktisch in allen Geräten des täglichen Lebens eingesetzt werden.

Diese schleichende Revolution hinsichtlich der Leistungsfähigkeit elektronischer Komponenten soll dazu führen, dass kleinste spontan und drahtlos miteinander kommunizierende Prozessoren bald quasi im Überfluss vorhanden sein werden. Mit dieser absehbaren Überschwemmung der Welt durch Rechenleistung würde ein Paradigmenwechsel in der Computeranwendung eingeläutet: Kleinste und billige Prozessoren, Speicherbausteine und Sensoren können zu diversen preiswerten „information appliances" zusammengebaut werden, die drahtlos mit dem Internet verbunden und für spezielle Aufgaben maßgeschneidert sind (Norman 1998; Want/Borriello 2000); sie können darüber hinaus aber auch aufgrund ihrer geringen Größe und ihres vernachlässigbaren Preises in viele Alltagsgeräte eingebaut werden. Dies gilt insbesondere für nach dem Verfahren der Weich-Lithographie hergestellte (polytronische) Bauelemente, die preiswert und massenhaft auf dünne Folien aufgedruckt werden können.

Immer wichtiger werden die Ergebnisse der Mikrosystemtechnik und auch der Nanoelektronik, welche beispielsweise zu kleinsten integrationsfähigen Sensoren führen, die unterschiedlichste Parameter der Umwelt aufnehmen können. Neuere Sensoren reagieren nicht nur auf die klassischen Größen Licht, Beschleunigung, Temperatur etc., sondern können auch Gase und Flüssigkeiten analysieren oder generell den sensorischen Input vorverarbeiten und so gewisse Muster erkennen.

Aus dem Bereich der Materialwissenschaft kommen Entwicklungen, die den Computern der Zukunft eine gänzlich andere äußere Form geben können oder sogar dafür sorgen, dass Computer auch äußerlich nicht mehr als solche wahrgenommen werden, weil sie vollständig mit der Umgebung verschmelzen. Als Beispiel können hier Licht emittierende Polymere genannt werden, die Displays aus hochflexiblen, dünnen und biegsamen Plastikfolien ermöglichen (s. o.). Außerdem wird auch an elektronischer Tinte und „smart paper" gearbeitet, welche Papier und Stift zum vollwertigen, interaktiven und hochmobilen Ein- und Ausgabemedium mit einer uns wohlvertrauten Nutzungsschnittstelle erheben. Zwar ist hier noch einiges an technischer Entwicklungsarbeit zu leisten, sollten sich elektronisches Papier und elektronische Tinte als technisch und kommerziell realisierbar erweisen, könnten sie für die Praxis, wenn Papier quasi zum Computer wird oder umgekehrt der Computer sich als Papier materialisiert, erhebliche Bedeutung erlangen.

Entwicklungen im Bereich von Body-Area-Networks zielen darauf ab, den menschlichen Körper selbst als Medium zur Übertragung von Signalen sehr geringer Stromstärken zu nutzen. Allein durch Anfassen eines Gerätes oder Gegenstandes kann diesem dann eine eindeutige Identifikation (die beispielsweise von der Armbanduhr in den Körper eingespeist wird) übermittelt werden. Auf diese Weise könnten Zugangsberechtigungen, personalisierte Konfigurierungen von Geräten oder die Abrechnung von Dienstleistungen erfolgen. Auch mit Kleidern aus Stoffen, die leitfähige Fasern enthalten, wird im Bereich des Wearable Computing experimentiert. Fasern, die beim Dehnen ihren elektrischen Widerstand ändern, ermöglichen jedenfalls interessante Mensch-Maschine-Schnittstellen, da so Körperbewegungen erfasst werden können oder Funktionen beispielsweise durch leichtes Ziehen an einem Stück der Kleidung ausgelöst werden können (vgl. Newman 2003).

Neben nanoelektronischen Bauelementen und Displays sind nanotechnologische Energiequellen für die allgegenwärtige Informationstechnik von besonderer Bedeutung. Die Batterietechnik macht im Vergleich zur sonstigen Effizienzsteigerung in der Informations- und Kommunikationstechnik eher langsame Fortschritte. Immerhin konnte die Kapazität typischer Batterien auf Ni-Cd- und Ni-MH-Basis in den letzten 20 Jahren um durchschnittlich 5 % pro Jahr vergrößert werden (Estrin et al. 2002). Die Energiedichte hat dabei mittlerweile einen Wert von 1 Joule pro mg erreicht, zudem lassen sich Batterien mittlerweile in dünner (0,5 mm) und biegsamer Bauform herstellen. Man hat die Hoffnung, mit neuen nanotechnologischen Materialien im Jahr 2010 Werte von 2 Joule pro mg zu erreichen. Können mit einer Energie von 1 Joule bei gegenwärtiger Technik ca. 10 Millionen Bits an Daten drahtlos übertragen werden, soll dieser Wert in den nächsten Jahren mindestens um den Faktor 10 gesteigert werden können (Doherty et al. 2001), da der Energiebedarf typischer Hardwareelemente mit der (sinkenden) mikroelektronischen Strukturbreite korreliert.

Neben der Entwicklung bei Batterien gibt es eine intensive Suche nach alternativen Energiequellen. Brennstoffzellen mit nanotechnologischen Katalysatoren und Membranen erreichen eine 10- bis 40fach höhere Energiedichte als Batterien, allerdings lassen sie sich derzeit nicht beliebig klein verwirklichen. Für den Betrieb von Laptops und ähnlichen Geräten sollten solche Brennstoffzellen jedoch bald auf den Markt kommen (VDI/FhG-INT 2002). Weitere Möglichkeiten, Energie in geringem Umfang aus der Umwelt abzuschöpfen, besteht z. B. bei mechanischer Energie aus vibrierenden Fensterscheiben oder Körperbewegungen (Paradiso 2000) bzw. bei der Nutzung von Körperwärme.

Schließlich bietet die Bottom-Up-Nanotechnologie die Möglichkeit zur Energieerzeugung durch molekulare Linear- oder Rotationsmotoren. Solche Nanomotoren könnten etwa aus ringförmigen Enzymmolekülen aus der Gruppe der Adenosithriphosphat-Synthase bestehen. Solche Generatoren könnten mit einer geeigneten Lithographietechnik auf dem Halbleitersubstrat positioniert werden und gezielt an solchen Stellen Energie produzieren, wo sie auch benötigt wird (Soong et al. 2000). Die Nutzung solch rein nanotechnologischen Energiequellen in der Praxis der Informations- und Kommunikationstechnik liegt allerdings in unbestimmter Zukunft.

Immer stärker miniaturisierte Hardwareelemente zu sinkenden Preisen sind allerdings nicht die einzige Voraus-

setzung für die Realisierung von allgegenwärtigen informationsverarbeitenden Systemen. Ebenso wichtig sind Fortschritte im Bereich der ubiquitären Kommunikation, der Softwaretechnik, des Knowledge-Managements sowie insbesondere bei der Entwicklung von benutzerfreundlichen, adaptiven und kontextsensitiven Formen der Mensch-Computer-Interaktion (vgl. Mattern 2003).

6.2 Anwendungsbeispiele für allgegenwärtige informationstechnische Systeme

So breit wie die technische Basis allgegenwärtiger informationstechnischer Systeme ist auch deren Anwendungsspektrum. Mit dem Anspruch einer unsichtbaren Unterstützung des Menschen bei jeder Form von Tätigkeit ist fast in allen Bereichen des privaten und geschäftlichen Lebens ein Einsatz dieser Technologie möglich. Exemplarisch wird im Folgenden ein Überblick über Anwendungen in den Bereichen Gesundheit und Sicherheit sowie Handel und Einkaufen gegeben.

Die fortschreitende Miniaturisierung elektronischer Bauelemente sowie eine Vielzahl kleiner und leistungsfähiger Sensoren hat den Gesundheitsbereich zum besonders lohnenden Anwendungsgebiet der allgegenwärtigen Informationsverarbeitung werden lassen. Durch ihre geringe Größe wird es heute möglich, leistungsfähige Computer ohne große Umstände dauerhaft mit sich zu führen oder diese in die Kleidung zu integrieren (Wearable Computer). Dies bietet die Möglichkeit, den Gesundheitszustand älterer, chronisch kranker oder mit bestimmten Risiken belasteter Personen sowie von Patienten nach bestimmten medizinischen Eingriffen kontinuierlich – auch außerhalb von Kliniken – zu überwachen. Bei einem solchen System werden neuartige, häufig nanotechnologische Sensoren unmittelbar am Körper getragen und ermöglichen die kontinuierliche, belastungsfreie Erfassung medizinisch relevanter Vitalparameter (Puls, Blutdruck, Glukosepegel etc.). Bei Parametern, die nicht unmittelbar durch Sensoren registriert werden, können nanotechnologische Labs-on-a-Chip die notwendigen Analysen durchführen. Die aufgezeichneten Daten werden drahtlos an eine mobile Basisstation und von dort an eine zentrale Datenbank (z. B. Patientenakte) oder Überwachungszentrale weitergeleitet.

Auf Basis eines solchen Monitorings sind eine ganze Reihe von gesundheitsrelevanten Leistungen möglich. Die stets aktuellen Daten stehen etwa dem Arzt für eine verbesserte Diagnose und Therapieplanung bzw. -überwachung zur Verfügung. In Kombination mit einem Expertensystem oder einem anderen wissensbasierten Verfahren ist auch eine Unterstützung des Mediziners bei der Diagnose möglich. Darüber hinaus kann im Falle einer Notfallsituation der Patient frühzeitig gewarnt und ein Rettungsdienst alarmiert werden, wobei dem Arzt bereits Informationen zur Art des Notfalls geliefert werden können (Kunze et al. 2002). Neben Vorsorge und Diagnose liegt ein wesentliches Anwendungspotenzial der Nanotechnologie im kontrollierten und zielorientierten Transport (Drug Delivery) von medizinisch wirksamen Stoffen, der auf Basis der gemessenen Vitalparameter gesteuert wird, z. B. bei Diabetespatienten (vgl. VDI/FHG-INT et al. 2002, S. 74 ff.; s. auch Kapitel VII).

Für autonome Serviceroboter wird ein mögliches Aufgabengebiet in der Kranken- und Altenbetreuung gesehen. Aber auch allgemeine Servicetätigkeiten im normalen Haushalt wie z. B. Putzen, Rasenmähen, Aufräumen und Kochen sind langfristig denkbar. Da für autonome Serviceroboter eine Objekterkennung in Echtzeit und in realen Umgebungen erforderlich ist, und darüber hinaus eine Echtzeitspracherkennung und die Fähigkeit, komplexe Prozesse zu erlernen und sich damit immer neuen Situationen und Umgebungen anpassen zu können, wünschenswert sind (Waser 2003), stellen diese große Anforderungen an die Rechenleistung bei gleichzeitig begrenztem Bauvolumen und Energieverbrauch und erfordern weitaus fortgeschrittenere informationstechnische Systeme als die heute verfügbaren.

Ein dem Gesundheitsmonitoring vergleichbarer Ansatz wird für die Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr verfolgt. Auch hier soll der Fahrer durch eine Vielzahl von kleinen, möglichst wenig störenden Sensoren während der Fahrt überwacht werden. Da es bei dieser Anwendung vor allem um die Erkennung von Symptomen einer eingeschränkten Fahrtüchtigkeit geht, kommen Sensoren zum Einsatz, mit denen Müdigkeit oder ein erhöhter Alkohol- bzw. Drogenkonsum erkannt werden kann (DaimlerChrysler 2002; Healey et al. 1999). Eine besondere Form der sicherheitsrelevanten Fahrerüberwachung ist das so genannte Affective Computing, bei dem man Emotionen, Gefühle und Empfindungen des Menschen registriert. Zu diesem Zweck werden Daten über Blutdruck, Muskelaktivität oder Leitfähigkeit der Haut dazu genutzt, um festzustellen, ob sich ein Autofahrer in einer Stresssituation befindet (Pompei et al. 2002). Anhand der so gewonnenen Informationen sollen Maßnahmen getroffen werden, die von der automatischen Verhinderung, ein Fahrzeug starten zu können, über automatische Geschwindigkeits- und Bremssysteme bis hin zur Unterdrückung ablenkender Reize in Stresssituationen reichen können.

Weiter gehende Konzepte haben die Entwicklung von Assistenzsystemen in der Verkehrstechnik, etwa zum autonomen Fahren, zum Ziel. Da die Echtzeiterkennung von Objekten in realen Umgebungen wie Straßen enorme Rechenleistung benötigt, kann sie zurzeit nur durch großvolumige und teure Rechner realisiert werden. Weitere Verkleinerung bei gleichzeitiger Erhöhung der Rechenleistung könnten dazu führen, dass sowohl das Volumen als auch der Preis der Systeme langfristig eine Serienausstattung von PKW möglich machen. Dabei sollen die Systeme zunächst lediglich als Assistenten zur Verbesserung der Sicherheit eingesetzt werden, ein (wahlweise) autonomes Fahren soll sich erst in einigen Jahrzehnten durchsetzen (Waser 2003).

Eine Anwendungsmöglichkeit der allgegenwärtigen Informationsverarbeitung in Handel und Einkauf basiert auf der Möglichkeit zur intelligenten Kennzeichnung von Waren. Dabei werden bereits in naher Zukunft die heutigen Barcodes durch Etiketten ersetzt, auf denen weiter gehende Informationen über die gekennzeichnete Ware

gespeichert sind und drahtlos abgefragt werden können. Die drahtlose Abfrage wird bereits seit Jahren bei Diebstahlsicherungen angewendet; künftige Etiketten können aber sehr viel mehr Daten speichern als die heutige Information bezahlt oder nicht bezahlt.

Voraussetzung für den massenhaften Einsatz solch intelligenter Etiketten ist, dass sie massenhaft und zu geringen Kosten hergestellt werden können. Passive Etiketten, so genannte RFIDs (Radio Frequency Identifiers), kosten heute zwischen 0,10 und 1 Euro, mit fallender Tendenz. Durch Verfahren der Nano-Weich-Lithographie (s. o.) können Stempel auch aus gekrümmten Materialien hergestellt werden, die eine kontinuierliche Herstellung preiswerter und genügend leistungsfähiger Folienchips erlauben.

Im Einzelhandel können mithilfe dieser Etiketten eine Vielzahl neuer Dienste angeboten werden (Nicklous/Welsch 2003). Kunden können mit einem passenden Endgerät die auf dem Etikett gespeicherte Information (Preis, Inhaltsstoffe, Verfallsdatum etc.) abfragen. Eine in diesem Gerät gespeicherte elektronische Einkaufsliste kann dazu genutzt werden, einen Kunden im Laden zu den benötigten Waren zu dirigieren und dabei beispielsweise auf Sonderangebote hinzuweisen. Zum Bezahlen können die Preisinformationen drahtlos von der Kasse ausgelesen werden. Als weitere Möglichkeiten im Umfeld des Handels werden u. a. die drahtlose Überwachung von Lagerbeständen und Logistikströmen mithilfe von drahtlos abfragbaren Etiketten oder die selbstständige Überwachung von technischen Einrichtungen (Autos, Maschinen) und die frühzeitige Erkennung von Schäden und Wartungsintervallen diskutiert.

Da einfache elektronische Etiketten bereits heute im breiten Einsatz sind, ist damit zu rechnen, dass intelligente Etiketten auf Basis nanotechnologischer Herstellverfahren bereits in wenigen Jahren im praktischen Einsatz sein werden. Dabei wird es zunächst zu einem unsichtbaren Ersatz älterer Etikettierungstechniken kommen. Die Durchsetzung der skizzierten neuen Dienstleistungen wird erheblich davon abhängen, inwieweit diese von den Kunden akzeptiert werden, da aufseiten der Anbieter nicht unerhebliche Investitionen für den Aufbau einer passenden Kommunikationsinfrastruktur getätigt werden müssen. Darüber hinaus ist der Nutzwert davon abhängig, ob sich ein einheitlicher Standard etabliert oder ob Kunden je nach Anbieter mit Insellösungen konfrontiert werden.

6.3 Bewertung

Zeitraum und Umfang der Realisierung der Vision des Ubiquitous Computing sind alles andere als klar. Die oben kurz beschriebenen Beispiele und die Vorstellung von allgegenwärtigen Informationstechnologien veranlassen Optimisten zu euphorischen Reaktionen, da die Technologie ein erhebliches Potenzial besitzt, das Leben der Menschen zu erleichtern. Gut ein Jahrzehnt nach Veröffentlichung des grundlegenden Artikels von Mark Weiser (1991) erscheinen nach Expertenmeinung aber auch „many aspects of Mark Weiser's vision of ubiquitous computing … as futuristic as they did in 1991“ (Davies/Gellersen 2002). Darüber hinaus werden vor allem Befürchtungen geweckt, durch allgegenwärtige Informationssysteme werde die Grundlage für einen totalen Überwachungsstaat gelegt.

Angesichts der zu erwartenden Allgegenwärtigkeit des Computers und den daraus resultierenden möglichen wirtschaftlichen, sozialen und gesellschaftlichen Auswirkungen stellt sich die Frage nach den vorhandenen Gestaltungsspielräumen. Die im Folgenden angerissenen Fragen bzw. Probleme sind gleichermaßen eine technische und ökonomische wie auch eine politisch-juristische Herausforderung (vgl. Bohn et al. 2003). Insbesondere stellt sich angesichts der Erfassung und drahtlosen Übertragung einer Vielzahl von teilweise hochsensiblen personenbezogenen Daten (z. B. Gesundheitsdaten) die Frage nach der Datensicherheit und dem Schutz der Privatsphäre in bislang nicht gekannter Größenordnung. Dabei kann – je nach Sichtweise – das Ubiquitous Computing die Reichweite und Auswirkungen heutiger Datenschutzmechanismen grundlegend verändern und dadurch in Zukunft substanziell andere soziale Landschaften hervorbringen. Insbesondere ist eine weitere Verschiebung sozialer, räumlicher und zeitlicher Grenzen zu erwarten, wie dies bereits bei der Einführung anderer Medientechniken (z. B. E-Mail) zu beobachten war.

Im Bereich der gesellschaftlichen Probleme ist vor allem daran zu denken, dass allgegenwärtige informationstechnische Systeme den Grad der Abhängigkeit von der korrekten und zuverlässigen Funktionsweise der Technik erheblich erhöht. Dies ist gerade in solchen Anwendungsbereichen besonders kritisch, in denen auch der größte Nutzen erwartet wird, wie etwa im Gesundheitsbereich. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der Beherrschbarkeit eines Systems, das aus zahlreichen intelligenten und damit wenigstens teilweise autonom agierenden Dingen sichergestellt werden soll. Dies betrifft nicht nur das technische System selbst, sondern auch die darauf aufbauenden Anwendungen. So verspricht zwar die durch ubiquitäre Informationstechnik unterstützte Wirtschaft ein besonders hohes Maß an Flexibilität, in der Realität kann sich das entstehende System aber als so unüberschaubar und dynamisch herausstellen, dass es von keinem Anbieter und Nachfrager mehr überschaut werden kann.

Ferner stellt sich die Frage nach der Zurechenbarkeit von Handlungen, bei denen der Mensch in erheblichem Maße durch ein technisches System unterstützt wird. Kann einem menschlichen Nutzer noch die Verantwortung zugeschrieben werden, wenn beispielsweise bei einem Ticketsystem eines Verkehrsbetriebs zwei technische Systeme einen Beförderungsvertrag aushandeln? Und wie kann man in einer solchen Welt einen Überblick über die Vielzahl der mehr oder weniger automatisch abgeschlossenen Verträge behalten oder gar die Transaktionen auf ihre Rechtmäßigkeit im Einzelnen überprüfen.

Schließlich bleibt die Frage, wie angesichts der gut gemeinten Unterstützung des Menschen dessen Entscheidungsautonomie sichergestellt werden kann. So wird niemand bezweifeln, dass das intelligente Auto mit Fahrer- und Fahrzeugüberwachung einen gewichtigen Beitrag zur Verkehrssicherheit leisten kann. Die Grenze zwischen einem notwendigen und vom Fahrer akzeptierten Eingriff

(z. B. automatisches Bremsen vor einem Hindernis) und einer als unakzeptabel betrachteten Intervention, zu der schon eine automatisch Geschwindigkeitskontrolle zählen kann, ist allerdings sehr schmal.

7. Zusammenfassung

Die Informations- und Kommunikationstechnik ist ein wichtiger und weiterhin stark wachsender Wirtschaftsbereich mit einem hohen Innovationstempo. Nach einer jahrzehntelangen Schwäche hat die deutsche Industrie in diesem Sektor in den vergangenen Jahren enorm aufgeholt und besitzt heute gute Voraussetzungen, die Herausforderungen der kommenden Jahre zu meistern, vor allem den Übergang von der traditionellen zur nanotechnologischen Elektronik.

Diese Entwicklung wird getragen von der Top-down-Entwicklung der Mikroelektronik hin zur Nanotechnologie, d. h. der zunehmenden Miniaturisierung bis an die Grenzen der Festkörperphysik, bei der ein Übergang zur Bottom-up-Nanotechnologie zwingend wird. Letztere befindet sich heute aber noch weitgehend im Bereich der Grundlagenforschung. Nanotechnologische Konzepte und Verfahren werden die weitere Entwicklung der Elektronikindustrie und deren industrielle Kontinuität mittelfristig – beginnend im Zeitraum zwischen 2005 und 2010 – sichern. Dabei existieren zahlreiche Produkte, Produktideen und Konzepte, deren Realisierungszeitpunkt von der Gegenwart bis zu einer ungewissen Zukunft reichen.

Bei neuen Logik- und Speichertechnologien werden nanotechnologische Ansätze schnell eine wichtige Rolle spielen. So ist bereits in naher Zukunft mit der Einführung von magnetischen RAMs und Resonanztunnelelementen in Logikschaltkreisen zu rechnen. Mittelfristig Erfolg versprechende Ansätze sind beispielsweise Einzelflussquanten-Logik (RSFQ) oder Einzelelektronentransistoren. Eine vollständig molekulare Elektronik – sei es auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren oder organischen Makromolekülen – liegt hingegen noch in weiter Ferne. Insgesamt geht es hier darum, Impulse aus der Grundlagenforschung für die industrielle Technologieentwicklung nutzbar machen. Tendenziell gilt hier – wie in der Vergangenheit bei der CMOS-Technologie –, dass Lösungen im Speicherbereich solchen bei Logikschaltkreisen um einige Jahre vorauseilen. Die nicht klassische CMOS-Technologie ist eine Fortsetzung der bekannten und beherrschten Mikroelektronik bis weit in den Nanometerdimension hinein. Hier wird insbesondere mit neuen Produktionsverfahren und Werkstoffen kurz- bis mittelfristig versucht, identifizierte technisch-wirtschaftliche Lücken entlang der vertikalen Wertschöpfungsketten bedarfsgerecht auszugleichen. Unabhängig vom Erfolg der alternativen Ansätze wird die CMOS-Technologie auch in absehbarer Zukunft das Arbeitspferd der Halbleiterindustrie bleiben.

Der Marktdurchbruch zur Nanotechnologie in der Informations- und Kommunikationstechnik könnte sich also in zwei Schritten vollziehen: Zunächst wird im Zuge der Top-down-Miniaturisierung die herkömmliche Mikrostrukturierung die Grenze zur Nanotechnologie überschreiten. Längerfristig könnten Bottom-up-Nanoelektronik und Nanosystemtechnik hinzutreten, in denen echte Nanotechnologien eingesetzt werden, etwa solche, die Selbstorganisationsprozesse für den Aufbau von Schaltkreisen und Systemen nutzen.

Neuartige, Nanotechnologie nutzende Systemarchitekturen sind die am weitesten in der Zukunft liegenden Entwicklungen. So befinden sich sowohl das DNA- als auch das Quanten-Computing noch im Stadium der Erforschung der Grundlagen. Erst seit relativ kurzer Zeit ist der experimentelle Nachweis der grundlegenden Funktionsprinzipien erbracht worden. Daher ist eine technische Nutzung kurz- bis mittelfristig nicht absehbar. Zumindest theoretisch besitzen beide Technologien durch die Möglichkeit zur massiven Parallelisierung der Datenverarbeitung erhebliches Potenzial für die Erhöhung der Rechengeschwindigkeit. Darüber hinaus besitzen beide inhärente Vorteile. So hat das DNA-Computing überall dort Vorteile, wo die – in Zukunft immer wichtiger werdende – Schnittstelle zu biochemischen Prozessen von Bedeutung ist. Mit dem Quantencomputer wird hingegen die Lösung von Problemen möglich, für die es keine effizienten klassischen Algorithmen gibt.

Aufgrund der großen Unwägbarkeiten wird insbesondere die Entwicklung von Quantencomputern auf industrieller Seite von solchen Unternehmen betrieben, die traditionell grundlagennahe Forschung betreiben. Hierzu gehören insbesondere IBM, Hewlett-Packard und Lucent-Technologies (ehem. Bell Labs). Deutsche Akteure finden sich kaum. Da zudem die Quantenkryptographie vor allem für militärisch-nachrichtendienstliche Anwendungen entwickelt wird, besteht für Deutschland das Risiko, auf diesem potenziell wichtigen Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnik frühzeitig den Anschluss zu verlieren.

Für beide Ansätze dürfte allerdings klar sein, dass sie den klassischen Computer für universelle Anwendungen im privaten und geschäftlichen Umfeld wegen des vergleichsweise hohen apparativen Aufwandes kaum ablösen dürften. Es wird sich also noch erweisen müssen, wie breit letztlich die Anwendungsbereiche sind, in denen DNA- bzw. Quantencomputer ihre inhärenten Vorteile ausspielen können. Die Frage, ob es sich um künftige Schlüsseltechnologien handelt, kann daher heute noch nicht beantwortet werden. Dies gilt umso mehr, als durch die Entwicklung nanoelektrischer Bauelemente auch herkömmliche Architekturen nochmals einen erheblichen Leistungsschub erfahren werden.

Eine wichtige Rolle für Innovationsanstrengungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechniken spielt das Paradigma der Systeme der allgegenwärtigen Informationsverarbeitung (Ubiquitous Computing). Diese Anwendungsvision setzt wichtige Beiträge der Nanotechnologie für ihre technische Basis voraus. So wird beispielsweise die propagierte totale und nahtlose Vernetzung von Mensch und Maschine erste durch die Entwicklung von höchstintegrierter (Opto-)Elektronik in Verbindung mit leistungsfähiger Funktechnik zu preiswerten Massenprodukten möglich. Von der Nanotechnologie sollen wichtige Impulse für die extreme Miniaturisierung,

die Konstruktion neuartiger Sensoren und die Möglichkeit zur Produktion billiger und leistungsfähiger polytronischer Schaltungen ausgehen. Dieses Anwendungsgebiet weist aber auch eine Vielzahl von technikinduzierten Implikationen auf. So stellt die Möglichkeit zur Sammlung, Verbreitung und Verarbeitung einer Vielzahl von teilweise personenbezogenen Daten die Technik, den Staat und die Gesellschaft vor zahlreiche Probleme aus den Bereichen der Persönlichkeitsrechte – insbesondere des Datenschutzes, der informationellen Selbstbestimmung und der wachsenden Abhängigkeit wichtiger gesellschaftlicher Funktionen von technischen Infrastrukturen.

VII. Vertiefungsthema: Anwendungen der Nanotechnologie im Bereich der Lebenswissenschaften

Da sich die grundlegenden Prozesse des Lebens wesentlich im Nanomaßstab abspielen, hat das Zusammenspiel von Nanotechnologie und Lebenswissenschaften erhebliche Bedeutung. Ziel des folgenden Kapitels ist es, einen Überblick darüber zu vermitteln, was das Wechselspiel von Nanotechnologie und Lebenswissenschaften (Life Sciences) ausmacht und welche Entwicklungsperspektiven sich bieten. Das Kapitel stützt sich in wesentlichen Teilen auf ein Gutachten der Basler & Hofmann AG Zürich (2002).

1. Nanotechnologie und Lebenswissenschaften

Zu den Lebenswissenschaften im engeren Sinn zählen Biologie und Humanmedizin sowie Veterinärmedizin mit den entsprechenden anwendungsorientierten Disziplinen, z. B. Medizintechnik und Biotechnologie. Berührungspunkte ergeben sich zu diversen aktuellen Entwicklungen; dazu zählen beispielsweise neue biomedizinische Therapien (Gentherapie, Zelltherapie, Xenotransplantation etc.), künstliche Implantate (Gewebe und Organe), die individualisierte Medizin (Pharmakogenomik etc.), aber auch die Telemedizin mit der Verwendung von Pervasive Computing (universeller Einsatz von miteinander kommunizierenden Mikrocomputern). Im weiteren Sinne zu den Lebenswissenschaften gehören auch Pharmazie, Kosmetik, Ökotrophologie, Agrarwissenschaft, Forstwissenschaft und Umweltwissenschaften. Anwendungen der Nanotechnologie in diesen Bereichen werden in der vorliegenden Studie weniger eingehend als die Anwendungen im biomedizinischen Bereich behandelt. Berührungspunkte mit den Lebenswissenschaften existieren zudem in Disziplinen wie Fischereiwirtschaft, Gesundheitswissenschaften, Hygienetechnik, Lebensmittelchemie und Umwelttechnik.

1.1 Wechselwirkungen

Lebende Organismen sind aus Zellen aufgebaut, die eine Vielzahl von Nanostrukturen enthalten. Proteine beispielsweise weisen Abmessungen zwischen einigen Nanometern bis zu wenigen zehn Nanometern auf. Ihre Wirkung entfalten sie meistens innerhalb geschlossener Kompartimente, z. B. von Zellorganellen, und sind dabei teilweise in weitere Strukturen, etwa Membranen, eingebunden (Köhler 2001). Durch Selbstorganisation entstehen in biologischen Systemen komplexe Nanostrukturen in großer Zahl, die ihre Funktion vielfach mit verhältnismäßig hoher Fehlertoleranz erfüllen. Solche Nanostrukturen können als Vorbilder für technische Anwendungen dienen, aber auch Ansatzpunkte für technische Anwendungen in und an lebenden Organismen bieten.

Fortschritte im Verständnis molekularer Mechanismen sind wesentliche Voraussetzung für die Integration und Anwendung der biomolekularen Funktionen in technischen Systemen. Zugleich eröffnen sich durch die Nanotechnologie Möglichkeiten, Biomoleküle gezielt für technische Anwendungen zu nutzen. Mit zunehmendem Verständnis der Prozesse biologischer Selbstorganisation ergeben sich gänzlich neue Anwendungsoptionen für innovative Konstruktionsmethoden nanoskaliger technischer Strukturen (VDI-TZ 2002, S. 1). Berührungspunkte zwischen Nanotechnologie und Lebenswissenschaften ergeben sich also, wo entweder

– Nanotechnologie eingesetzt wird, um Ziele der Biowissenschaften zu erreichen, und/oder

– Nanotechnologie von Erkenntnissen und Verfahren aus den Biowissenschaften profitiert.

Mögliche Anwendungen der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften (Nano2Bio) sind unter anderem Nanoanalytik (z. B. Rastersondentechniken), Nanomanipulationstechniken für biologische Strukturen und Objekte, nanotechnologisch hergestellte Wirkstoffe für lebende Organismen, Nanofähren für den Transport von Wirkstoffen, Nanomaschinen, Nanorobotik für Forschung, Diagnostik und Therapie, nanotechnologisch beschichtete Implantate sowie nanoelektronische, insbesondere neurologische Implantate.

Mögliche Anwendungen der Lebenswissenschaften in der Nanotechnologie (Bio2Nano) hingegen sind z. B. nanotechnologische Anwendungen nach biologischen Vorbildern (z. B. unter Nutzung biologischer Adaptations- und Selbstorganisationsfähigkeiten), der Einsatz biologischer Bausteine im Nanomaßstab für technische Systeme (z. B. Diagnostiksysteme) oder die Nanoelektronik und Nanoinformatik unter Verwendung biologischer Bausteine, Funktions- oder Organisationsprinzipien.

Verschiedene biologische Strukturen sind als Konstruktionsmaterialien und Werkzeuge für die Nanotechnologie interessant. Sie sind modular aufgebaut (z. B. Proteine aus Aminosäuren, DNA aus Nukleotiden) und fügen sich zu stabilen, dreidimensionalen Gebilden zusammen. Vielfach üben sie zudem, wie etwa Enzyme, eine Funktion als „Nanomaschinen“ aus und lassen sich durch geeignete Hilfssubstanzen oder andere Einwirkungen aktivieren bzw. deaktivieren (Köhler 2001).

1.2 Nanobiotechnologie

Die Nanobiotechnologie ist eine Spezialdisziplin der Nanotechnologie. Sie befasst sich mit einem wesentlichen Ausschnitt der unter Wechselwirkungen beschriebenen Berührungspunkte von Nanotechnologie und Lebenswissenschaften. Die Nanobiotechnologie stellt Anwendungsmöglichkeiten in Aussicht, die zu Systemkomponenten eines konkreten Produkts oder zu Analyse- und Herstel-

lungsverfahren führen können. Nach Hartmann (2001) ist die Nanobiotechnologie demnach eine Disziplin, die biologische Bausteine und Materialien verwendet oder erzeugt, auf Baupläne und Ordnungsprinzipien der Natur zurückgreift, zur Unterstützung biotechnologischer Prozesse eingesetzt wird oder mit deren Unterstützung biokompatible und biofunktionale Materialien hergestellt werden. In einer Studie des VDI (VDI-TZ 2002a) werden als charakteristische Aspekte der Nanobiotechnologie genannt:

– Nanoskaligkeit in mindestens zwei Dimensionen, die für die Anwendung eine funktionstragende Rolle spielt;
– Biokomponente als Bestandteil der Anwendung;
– Potenzial zum Maßschneidern der funktionellen Einheiten oder zur Kontrolle bzw. für eine Ansteuerung auf der Nanoskala.

Die Nanobiotechnologie stellt ein noch junges, in höchstem Maß interdisziplinäres Denken und Kooperation erforderndes Teilgebiet der Nanotechnologie dar. Es bildet (auf der Nanoskala) eine Verbindung zwischen der Forschung an biologischen und nicht biologischen Systemen und hat deren Nutzung in verschiedenen Bereichen zum Ziel. Die Nanobiotechnologie hat sich in den letzten fünf Jahren zu einem eigenständigen Bereich an der Schnittstelle zwischen vielen unterschiedlichen Disziplinen (u. a. Biophysik, Mikrosystemtechnik, Biotechnologie, Gentechnik, Biochemie und Nanotechnologie) entwickelt. Beispielsweise spielen sich viele wichtige Prozesse in der Biologie auf der molekularen Ebene ab. Nanoskalige Strukturen von Proteinen sind entscheidend für deren Funktion. Mit der Entwicklung von Werkzeugen zur Analyse und Manipulation nanoskaliger Strukturen in der Nanotechnologie wurde eine wichtige Grundlage dafür geschaffen, biologische Baupläne und Prinzipien für technische Anwendungen zu nutzen.

1.3 Biologische und technische Nanosysteme

So genannte nanoskalige Werkzeuge gibt es auch in biologischen Organismen, und ihr genaueres Verständnis könnte die (technische) Kontrollierbarkeit von komplexen Systemen auf molekularer Ebene ermöglichen. Eine Vielzahl an synergistisch arbeitenden Bionanomaschinen ist bekannt, z. B. bei der Energieerzeugung in den Photosynthesezentren der Pflanzen (die mithilfe von Licht biochemisch nutzbare Energiespeichermoleküle produzieren), in molekularen Fabriken (Mitochondrien der Zellen) und molekularen Transportsystemen (Mikrotubuli und Motorproteine) oder in den Datenspeicher- und -lesesystemen mit höchster Kapazität (DNA).

Natürliche (biologische) Nanomaschinen

Die Natur hat seit ca. 3,5 Mrd. Jahren Zellen mit hochspezialisierten Leistungen hervorgebracht, die zugleich aber auch viele Funktionen gemeinsam haben. Zellen sind voll von Proteinmolekülen, die einzelne Aufgaben erfüllen oder in makromolekularen Proteinkomplexen wie kleine Maschinen arbeiten. Beispiele sind:

– das Ribosom, das Proteinmoleküle aus Aminosäuren nach Bauplan zusammensetzt;
– der turbinenartige ATP-Synthase-Komplex, der, von durchströmenden H+-Ionen angetrieben, die universelle Energiebewährung der Zelle – ATP – produziert;
– Aktinfilamente als Schienen, auf denen Myosinmoleküle als Motoren laufen, und die andererseits als Antrieb von (infektiösen) Bakterien verwendet werden.

Die Bauprinzipien, die diesen biologischen Maschinen zugrunde liegen, können als eine Anleitung für die technische Miniaturisierung dienen.

Eine besondere Rolle spielen funktionelle Biomoleküle, die als Signalwandler, Katalysatoren, Pumpen, Motoren oder als Teil von Lichtsammel- und Umwandlungsanlagen arbeiten. Für den Aufbau und den Betrieb dieser Strukturen nutzt die Natur insbesondere die Fähigkeit zur Selbstorganisation der biomolekularen Bauteile (VDI-TZ 2002, S. 1).

Vergleicht man jedoch die Prinzipien in der belebten Natur mit entsprechenden technischen Verfahren und Systemen, so werden einige gravierende Unterschiede offensichtlich (vgl. Tabelle 12, S. 114).

Ein typisches Beispiel sind die energieaufwendigen Herstellungsverfahren heutiger Technik und die vergleichsweise energiearme, selbstorganisierende Umsetzung biologischer Baupläne für hochkomplexe Einheiten in lebenden Zellen. Diese Unterschiede beruhen im Wesentlichen darauf, dass in der Natur die Produktion aller notwendigen Stoffe in einer Zelle im Nanobereich abläuft. In allen lebenden Organismen findet zudem ein Stoffwechsel statt. Bei all diesen Vorgängen kommen verschiedene Moleküle als Nanomaschinen zum Einsatz (VDI-TZ 2002, S. 2).

Festzuhalten ist jedoch, dass heute noch nicht alle biologischen Nanoprozesse vollständig beschreibbar, erst recht noch nicht technisch nutzbar sind.

Zugleich unterliegt (auch) die Biotechnologie dem allgemeinen Miniaturisierungstrend der modernen Hochtechnologien zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und verstärkten Integration neuer Funktionalitäten. Der Schnittpunkt dieser Ansätze mit technischen Anwendungen aus verschiedensten Bereichen liegt auf der Nanoskala. Eine sinnvolle Einteilung der Anwendungen orientiert sich an den Transferrichtungen zwischen nanoskaligen Systemen. Zwei Transferrichtungen, die im Folgenden an zwei Beispielen erläutert werden sollen, können unterschieden werden, und zwar nano to bio (Nano2Bio) und bio to nano (Bio2Nano).

Tabelle 12

Vergleich biologischer und technischer Systeme

Verfahren/Eigenschaft	biologische Systeme	technische Systeme
Herstellungsprozess	– bottom-up – Selbstorganisationsprozess; langsames Wachsen funktioneller Einheiten auf molekularer Ebene, Verbindung zu größeren Systemen	– top-down – großtechnische Fertigung mit makroskopischen Geräten – technische Verfahren für große Mengen
Kontrollierbarkeit	– durch Vielzahl spezialisierter und netzwerkartig arbeitender Nanomaschinen auf molekularer Ebene	– nur in kleinen Ausschnitten auf molekularer bzw. atomarer Ebene möglich oder als statistisches Ensemble
Materialien	– flexibler Grundbausatz; wenige Klassen von Biomaterialien, für diverse Funktionen optimierbar – Biokomposite (Nano/Mikro)	– generalisierter Bausatz, breite Palette an Elementen und Verbindungen mit unterschiedlichen Eigenschaften
Energieaufwand	– gering; höchst effiziente Umwandlungskette mit chemischen Trägerstoffen, aber molekulare Abbauprodukte	– hoch; oft hoher Temperaturbereich, vergleichsweise geringe Wirkungsgrade, Verlust durch Abwärme
Umweltverträglichkeit	– unter natürlichen Bedingungen problemlos	– häufig problematisch
Stabilität/Flexibilität	– vergleichsweise empfindlich – nachwachsend, flexibel, regenerationsfähig, natürliche Abbauprozesse, selbstkorrigierend	– i. d. R. langzeitstabil – eher unflexibel, nicht selbstreparierend – technische Lösungen für viele Umweltbedingungen

Quelle: nach VDI-TZ 2002, S. 3

1.4 Nano2Bio und Bio2Nano

Unter der Transferrichtung Nano2Bio ist die Nutzung nanotechnologischer Verfahren und Materialien für die Untersuchung biologischer Fragestellungen zu verstehen. Ein Beispiel dafür ist die Verwendung von fluoreszierenden oder magnetischen Nanopartikeln in Mikroarrays, die bei Hochdurchsatz-Screening-Verfahren in der DNS- bzw. Genanalytik zum Einsatz kommen. Die Nanopartikel werden an biologische Rezeptoren geknüpft, um so ein Bindungsereignis zu detektieren, das z. B. das Vorhandensein eines bestimmten Antikörpers anzeigt. Besonders im Bereich der Medizin, Pharmazie und Biotechnologie zeichnen sich einige Hauptrichtungen für die Nanobiotechnologie ab, in denen mittelfristig Anwendungen zu erwarten sind und auf die in Kapitel VII.2 näher eingegangen wird:

– Analytik und Wirkstoffforschung (in vitro): z. B. Genomik, Proteomik;

– Diagnostik: z. B. Antikörper-Nachweis, molekulare Krankheitserkennung und Frühdiagnostik, Biosensoren, Toxizitätsuntersuchungen;

– ortsgenaue(r) Wirkstofftransport und -deposition (drug delivery), ortsgenaue Therapieverfahren: Verkapselungen, gezielte Freisetzung, Gen-Schalter;

– biokompatible Materialien und Oberflächen, künstliche Gewebe und Knochen (tissue engineering).

Die Transferrichtung Bio2Nano steht für bio(techno)logische Materialien und Baupläne zur Herstellung funktionaler, technischer Nanosysteme. Diese könnten in den Bereichen Information und Kommunikation, Energie und Umwelt u. a. m. für technische Anwendungen nutzbar gemacht werden.

Beispielsweise wurde mit nanoskopischen Untersuchungsmethoden festgestellt, dass die Zellhüllenmembran von Bakterien eine regelmäßige nanoporöse Struktur besitzt. Die Membran wird aus selbstorganisierenden Proteinkomplexen aufgebaut, die sich zu periodischen Mustern anordnen, welche nanometergroße Poren für den definierten Stoffaustausch mit der Umgebung und für die gleichzeitige Abschirmung gegen die Umwelt besitzen, die so genannten S-Schichten (engl.: Surface layers). Derartige Erkenntnisse über biologische Prinzipien und

Strukturen auf der Nanoskala ermöglichen neuartige Anwendungen, die über den Bereich der Lebenswissenschaften hinausgehen. Bakterielle S-Schichten könnten in Zukunft beispielsweise als Strukturierungselemente bei der Herstellung dichter Metallcluster-Anordnungen dienen, die als hocheffiziente Sensoren oder Katalysatoren gute Anwendungspotenziale besitzen.

Biologische Komponenten können also auch Anwendungen auf der Nanoskala ermöglichen und einen Transfer von der Biologie zur Nanotechnologie leisten. Zu den Technikanwendungen, die sich derzeit in der Entwicklung befinden und eher mittel- bis langfristig zu betrachten sind, gehören z. B.:

– Biosensoren;

– Biomaterialien (z. B. Spinnenseide, biomimetische Klebstoffe), Biomineralisation, Biomembranen (z. B. S-Schichtsubstrate);

– biomolekulare Motoren und Maschinen;

– (programmierte, steuerbare) Selbstorganisation, biologische Nanokonstruktionshilfen.

Das folgende Kapitel VII.2 befasst sich in der Hauptsache mit den Grundlagen und Anwendungsperspektiven der Nanotechnologie innerhalb der Lebenswissenschaften. Dabei werden vorwiegend Nano2Bio-Aspekte angesprochen. Zum Teil findet aber auch die Transferrichtung Bio2Nano Berücksichtigung. Es gibt natürlich Berührungspunkte und Überschneidungen zwischen den Transferrichtungen.

2. Stand und Perspektiven

Für den Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften gibt es bisher noch keine allgemein anerkannte Klassifizierung. Eine Unterteilung der vielfältigen Forschungsgebiete könnte etwa anhand der verwendeten Methoden oder der Art der Wechselwirkungen zwischen Nano- und Bioanteil in den jeweiligen Projekten vorgenommen werden. Aus methodischer Sicht ist beispielsweise folgende Unterteilung möglich: Verwendung von Nanopartikeln oder von Nanoröhrchen; Verwendung anderer Nanostrukturen, einschließlich großer Einzelmoleküle; Verwendung von Nanobeschichtungen; Rastersondentechniken; Nano-Computing; Nanomaschinenbau.

Nach Einsatzgebiet aufgegliedert können sich die in Tabelle 13 angeführten Hauptanwendungsbereiche ergeben (siehe unten).

Der jeweilige Nano- und Bioanteil im Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften lässt sich ebenfalls zur Klassifizierung nutzen, so z. B.:

– nanotechnologische Verfahren für Anwendungen in den Lebenswissenschaften, z. B. nanotechnologisch beschichtete Knochenimplantate;

– biologische Strukturen und Vorbilder für nanotechnologische Anwendungen, z. B. DNA-Computing;

– gemischt nano-/biotechnologische Anwendungen, z. B. mit monoklonalen Antikörpern bestückte Nanopartikel für das Drug Targeting.

Die Überschneidungen zwischen diesen Gebieten sind allerdings ausgeprägt.

Im vorliegenden Bericht wurde für das Kapitel Nanotechnologie und Lebenswissenschaften eine Strukturierung gewählt, die primär die Anwendungsbereiche berücksichtigt; sekundär einbezogen sind auch die angewendeten Verfahren. Hierbei ist jedoch – wie schon eingangs erwähnt – zu berücksichtigen, dass sich viele Vorhaben zurzeit noch im Stadium der Grundlagenforschung befinden, somit der Anwendungsbezug eher prospektiv zu verstehen ist. Um die vorgenommene Einteilung zu konkretisieren, werden aktuelle Beispiele aufgeführt, die zum Teil illustrativen Charakter besitzen.

Tabelle 13

Hauptanwendungsbereiche der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften nach Einsatzgebiet

Adressat	Wirkungsebene
Mensch, Tier	– systemisch: z. B. in Nanopartikel verpackte Vitamine – bestimmtes Organ/Gewebe: z. B. Blutdiagnose mit Lab-on-a-Chip; Sonnenschutzcreme mit Nanopartikeln – bestimmter Zelltyp: z. B. Drug Targeting mit Nanopartikeln – indirekte Wirkung: z. B. nanotechnologisch hergestellte Lebensmittelverpackung; medizinische Instrumente mit nanotechnologischer Beschichtung
Pflanze	– systemisch: z. B. mithilfe nanotechnologischer Verfahren hergestellte Wachstumsförderer – bestimmtes Organ/Gewebe: z. B. in Nanopartikel verpacktes Fungizid – bestimmter Zelltyp: z. B. Drug Targeting mit Nanopartikeln

Quelle: nach Basler & Hofmann 2002, S. 14

2.1 Biologische Strukturen und Prozesse

Seit der Erfindung des elektronischen Rastertunnelmikroskops vor etwa 20 Jahren wird in der Wissenschaft intensiv nach Möglichkeiten geforscht, den Nanokosmos zu erobern und ihn mithilfe der Nanotechnologie (für technische Anwendungen) nutzbar zu machen. Seitdem wurden viele neue Werkzeuge zur Herstellung und Manipulation von mesoskopisch kleinen Strukturen entwickelt (Bachmann 1998; s. auch Kapitel II.2.2).

2.1.1 Nanoskalige Mikroskopie

Das Rastertunnelmikroskop wurde Anfang der 1980er-Jahre von Gerd Binning und Heinrich Rohrer entwickelt, die dafür 1986 den Nobelpreis erhielten. Eine leitfähige Spitze (Sonde) wird nahe an die zu messende Probe herangeführt und eine Potenzialdifferenz zwischen Spitze und Probe aufgebaut. Die Stärke des daraufhin fließenden Tunnelstroms ist von der Entfernung zwischen Spitze und Probenoberfläche abhängig. Auf diese Weise lassen sich Oberflächen mit atomarer Auflösung abbilden.

Eine Weiterentwicklung des Rastertunnelmikroskops stellt das Kraftmikroskop dar. Bei der Kraftmikroskopie werden die Kräfte gemessen, die zwischen der Spitze und der Oberfläche der Probe auftreten. Die so erzielte Auflösung liegt in der Regel im Nanometerbereich, unter günstigen Bedingungen kann auch eine atomare Auflösung erreicht werden. Mithilfe der Kraftmikroskopie lassen sich biologische Proben in weitgehend natürlichem Zustand und natürlicher Umgebung untersuchen. Eine Behandlung der Probe wie Fixierung, Dehydrierung oder Beschichtung ist nicht erforderlich, oft können physiologische Medien zum Einsatz kommen. Die Proben müssen allerdings immobilisiert sein. Dynamische Prozesse lassen sich nur durch Verwendung zusätzlicher Techniken verfolgen (Laval et al. 2000; Revenko 2001; Rubahn 2002).

Nachfrage und Perspektiven

In der biowissenschaftlichen Forschung besteht ein großer Bedarf an Verfahren, mit denen biologische Proben in vivo bis hinab zum Nanomaßstab untersucht werden können. Das angewandte Verfahren sollte kostengünstig, die Mikroskope leicht zu bedienen sein. Interesse an solchen Analyseinstrumenten ist auch bei der medizinischen Diagnostik vorhanden.

Bei den Kraftmikroskopen handelt es sich bereits heute um verhältnismäßig kleine Geräte. Der technische Aufwand, der erforderlich ist, um beispielsweise wie bei der Elektronenmikroskopie ein Vakuum zu erzeugen, entfällt. Kraftmikroskopie kann mit anderen optischen Untersuchungstechniken, z. B. Fluoreszenzmikroskopie, gekoppelt werden und ermöglicht es damit, Objekte umfassend zu untersuchen (Revenko 2001). Die Geräte sind jedoch immer noch aufwendig in Unterhalt und Bedienung. Für eine routinemäßige Anwendung, beispielsweise in medizinischen Labors, wären weitere Entwicklungsschritte erforderlich.

Diese neuen nanotechnologiebasierten Verfahren stehen in Konkurrenz zu bestehenden Verfahren und Anwendungen, die im Folgenden beschrieben werden.

Im Gegensatz zu den Rastersondenmethoden erlaubt es die Fluoreszenzlichtmikroskopie, mithilfe markierter Organellen oder Moleküle weitgehend ungestört Prozesse in der Zelle in vivo zu verfolgen. Allerdings ist der (verbleibende) Einfluss der Fluoreszenzmarker auf die zu untersuchenden Prozesse oft nicht hinreichend bekannt. Mit dem Lichtmikroskop konnten bisher Strukturen nur mit einer Auflösung von 200 nm untersucht werden (Alberts et al. 2002). Mit einer neuen computerunterstützten Technik haben Wissenschaftler des MPI für biophysikalische Chemie in Göttingen kürzlich jedoch auch ca. 30 nm messende Details sichtbar gemacht (FAZ 2002c).

Elektronenmikroskopie ist in vivo nicht möglich. Durch sehr schnelles Einfrieren der Proben werden Artefakte, die vor allem auf die Dehydration der Proben zurückgehen, reduziert. Die Auflösung moderner Elektronenmikroskope reicht derzeit aus technischen Gründen bis zu 0,1 nm. Computerunterstützte Bildanalyse erlaubt es, aus elektronenmikroskopischen Bildern dreidimensionale Ansichten zu konstruieren. Mit Rasterelektronenmikroskopie werden plastische Abbildungen von Oberflächen erzeugt (Alberts et al. 2002). Strukturen biologischer Moleküle, insbesondere von Proteinen, lassen sich mithilfe der Röntgenstrukturanalyse untersuchen. Die Auflösung reicht bis zur atomaren Ebene. Die Röntgenstrukturanalyse setzt die Kristallisation der zu untersuchenden Moleküle voraus, die in ausreichender Menge und Reinheit vorliegen müssen. Auch bei dieser Methode sind in-vivo-Untersuchungen nicht möglich.

Für die Magnetresonanztomographie werden Kontrastmittel entwickelt, die superparamagnetische Nanopartikel enthalten (Kim et al. 2002). Eine neu konzipierte Röntgenquelle, deren Kathode aus Kohlenstoffnanoröhrchen besteht, verbraucht weniger Energie als herkömmliche Geräte, erlaubt eine bessere Strahlungsdosierung und liefert Bilder mit sehr hoher Auflösung (FAZ 2002b).

Mit Kernspinresonanzspektroskopie dagegen lassen sich Moleküle in konzentrierten Lösungen untersuchen. Das Verfahren galt lange als vor allem für kleinere Moleküle geeignet; mit zunehmendem Molekulargewicht nahm die Auflösung ab (Alberts et al. 2002). Neuere Verfahren erlauben es jedoch inzwischen, auch größere Proteinkomplexe zu untersuchen (Schwalbe/Griesinger 2002).

Falls die routinemäßige Beobachtung ungestörter biologischer Prozesse im Nanomaßstab gelingen sollte, sind erhebliche Erkenntnisfortschritte in den Biowissenschaften zu erwarten. Dies würde voraussichtlich mit einem breiten Spektrum von Auswirkungen verbunden sein. Beispielsweise könnten neue Erkenntnisse zur Pathogenese für eine wirksamere medizinische Prävention genutzt und zielgerichtetere Therapien entwickelt werden.

Beispiele

Die Identifikation bakterieller rRNAs durch ortsaufgelöste Einzelmolekülkraftspektroskopie hat sich die Ar-

beitsgruppe um Ch. Albrecht des Unternehmens nanotype GmbH zur Aufgabe gemacht. Das Projekt wird von der Fördermaßnahme Nanobiotechnologie des BMBF unterstützt.

Mit der Manipulation und funktionellen Charakterisierung einzelner Biomoleküle in biologisch kompatiblen Medien beschäftigt sich Prof. B. Brenner, Abteilung für Molekular- und Zellphysiologie an der Medizinischen Hochschule Hannover. Auch dieses Projekt wird im Rahmen der Fördermaßnahme Nanobiotechnologie des BMBF unterstützt.

2.1.2 Diagnostik und Analyse biologischer Systeme

Nanosensoren, die innerhalb oder außerhalb lebender Organismen funktionieren, sind Gegenstand zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Einzelne Produkte befinden sich bereits auf dem Markt.

Untersuchungen von RNA-Transkripten, Proteinen und Antikörpern werden mit Quantenpunkten – fluoreszierenden Nanopartikeln, die an Antigene, Antikörper oder Oligonukleotide binden – vorgenommen (Robinson 2002). Für RNA-Proben sind Tests zur Qualitätskontrolle bis hinab zu Mengen von 5 ng RNA heute schon kommerziell erhältlich (Agilent 2001).

> Quantenpunkte sind Halbleiterkristalle mit Abmessungen von einigen Nanometern. Die in diesen Kristallen enthaltenen Elektronen sind in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt und können nur diskrete Energieniveaus einnehmen. Der Sprung eines Elektrons von einem höheren auf ein niedrigeres Energieniveau führt dazu, dass Licht einer genau definierten Wellenlänge ausgesandt wird, die von der Größe des Halbleiterkristalls abhängig ist. Biologische Moleküle können mit Quantenpunkten markiert und somit beobachtet werden. Werden verschiedene Moleküle mit Quantenpunkten markiert, die in unterschiedlichen Farben leuchten, lassen sich das Schicksal jeder Molekülart und deren Wechselwirkungen verfolgen.

Diagnosechips für Krankheiten und genetische Dispositionen werden von verschiedenen Start-up-Unternehmen entwickelt. Dabei wird in der Regel die Bindung biologischer Moleküle auf dem Chip registriert (Stikeman 2002). An DNA-Fragmente gekoppelte Nanopartikel z. B. erlauben die Identifikation definierter DNA-Sequenzen (Nanosphere 2001). Viren und Zelltypen können aufgrund von Oberflächeneigenschaften identifiziert werden, die sie an bestimmte Nanostrukturen haften lassen (Port/Crockett 2002). Auch Proteinchips befinden sich in der Entwicklung (Lang 2002).

Die Nanotechnologie kann bei der Optimierung von Biochips helfen. Mit solchen Diagnosechips lassen sich Tausende von Genen gleichzeitig untersuchen. Dazu werden im Labor hergestellte Genstücke mit bekannten Eigenschaften auf die Chipoberfläche geklebt. Eine Diagnose hängt z. B. davon ab, an welche Genstücke sich die DNA aus dem Blut eines Patienten anlagert. Ist die Gensequenz verändert, lagert sie sich nicht an. Das Muster von gekoppelten und nicht gekoppelten Genstücken erlaubt Rückschlüsse auf mögliche Krankheiten. Je kleiner der Chip ist, desto weniger Blut eines Patienten wird benötigt, um eine sichere Diagnose zu stellen (Berliner Zeitung 2003a).

> Lab-on-a-Chip bezeichnet ein Labor im Miniaturformat, in dem chemische Reaktionen stattfinden und Analysen vorgenommen werden können. Bei seiner Konzeption müssen die spezifischen physikalischen Rahmenbedingungen im Nanometerbereich berücksichtigt werden, es handelt sich also um innovative Konstruktionen.
>
> Wichtige Klassen von Labs-on-a-Chip sind mikrofluidische Systeme und Mikroarrays. In mikrofluidischen Systemen bewegen sich Flüssigkeiten kontrolliert durch sehr kleine Kanäle und können dabei chemische Reaktionen eingehen. Mikroarrays enthalten Molekülproben, meistens DNA-Fragmente, die in der Lage sind, Bestandteile der zu analysierenden Probe zu binden.
>
> Vorteile der Lab-on-a-Chip-Technologie liegen in den geringen benötigten Probenmengen und einem schnellen Materialdurchsatz. Chemische Analyse- und Syntheseprozesse laufen genau gesteuert und erheblich beschleunigt ab, Reaktionswärme wird leichter abgeleitet. Aus handlichen, modularen Einheiten lassen sich in kurzer Zeit Minilabore konfigurieren. Dies ist vor allem dort von Interesse, wo eine Vielfalt von Substanzen in relativ kleinen Mengen hergestellt wird.
>
> Einige Unternehmen bieten bereits Lab-on-a-Chip-Produkte an. Vor einem breiten Einsatz müssen noch zahlreiche Probleme gelöst werden. Die technischen Aufgaben sind im Allgemeinen leichter als die biologischen zu lösen. So ist es beispielsweise schwierig, DNA in ausreichender Reinheit und Menge auf einen Chip aufzubringen. Zudem treten Wechselwirkungen zwischen DNA-Proben und den Oberflächen von Kanälen in den Chips auf.
>
> Künftige Einsatzgebiete könnten etwa die Krebsdiagnose und die individualisierte Medizin sein. Die Weiterentwicklung der Technologie wird allerdings gegenwärtig durch zwei zentrale Patente behindert, über die Affymetrix und Oxford Gene Technology Ltd. verfügen und die anderen Unternehmen die Arbeit an Labs-on-a-Chip erschweren (Aschenbrenner 2002; Hanselmann 2002; Sharpe 2001 u. 2002; Speicher 2002; Frost/Sullivan 2002c).

Nachfrage und Perspektiven

Nachfrage ist für biomedizinische Analysen zu erwarten, die unkompliziert in jeder Arztpraxis oder auch vom Patienten zu Hause vorgenommen werden können. Diagnosechips, die es erlauben, Laboranalysen mit kleinsten biologischen Proben zu Hause vorzunehmen, würden voraussichtlich sowohl zu medizinischen Zwecken, etwa

der regelmäßigen Überwachung der mütterlichen Blutwerte während einer Schwangerschaft, als auch zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit, beispielsweise zur Vorbereitung auf sportliche Wettkämpfe, eingesetzt. Interesse an Verfahren, die mit sehr geringen Probenmengen auskommen, ist auch im Bereich der Kriminaltechnik vorhanden. Synergien bestehen mit der Telemedizin: Chronischkranke oder Risikopatienten etwa können mithilfe implantierter Sensoren im Nanomaßstab überwacht werden. Im Bedarfsfall fordert der Sensor z. B. automatisch Hilfe an oder löst die Behandlung durch ebenfalls implantierte Nanodosiervorrichtung für Medikamente aus.

Manche Typen von Quantenpunkten sind herkömmlichen Markern überlegen, da sie leistungsfähiger, ungiftig und langlebig sind (Zandonella 2001). Diskutiert wird auch die Verwendung von Nanoröhrchen, die im nahen Infrarot fluoreszieren, um etwa Tumoren oder Entzündungsherde zu detektieren (Joslin 2002). In den Körper eingepflanzte Nanosensoren werden in der Regel für den Träger nicht spürbar sein und stellen eine Form der Überwachung dar, die die Lebensqualität der Patienten kaum beeinträchtigt (Pobojewski 2002).

In der Forschung besteht Bedarf an Sensoren, die es erlauben, das Verhalten von Biomolekülen und Zellorganellen in vivo zu verfolgen. Kleinste Sensoren, die in biologische Organismen eingepflanzt werden, könnten in Medizin und Forschung Auskunft über äußere Belastungen und den physiologischen Zustand des Organismus geben. Kleine Sensoren, die frühe Anzeichen einer Erkrankung, z. B. Krebs oder Herzinfarkt, erkennen (Stikeman 2002), verfügen ebenfalls über ein hohes Marktpotenzial. Sensoren, die permanent die Belastung durch Krankheitserreger, Strahlung und toxische Substanzen sowie wichtige Indikatoren für den Gesamtgesundheitszustand besonders exponierter Personen erfassen (Stilwell 2000), werden zwar nur bei kleineren Bevölkerungsgruppen angewendet werden. Da dort die Überwachung jedoch besonders wichtig ist, besteht voraussichtlich auch Bereitschaft, in die Entwicklung geeigneter Nanosensoren zu investieren.

Bei der Entwicklung von Arzneimitteln und Agrochemikalien besteht Nachfrage nach Vorkehrungen zur schnellen, günstigen und massenhaften Prüfung von chemischen Substanzen auf ihre biologische Wirksamkeit. Eine wirtschaftliche Optimierung wäre zudem durch die Überwachung wichtiger gesundheitlicher Parameter bei Nutztieren und -pflanzen möglich.

Im Bereich der Arbeits- und Umweltmedizin besteht Bedarf nach kleinen Biosensoren, die es erlauben, Schadstoffbelastungen an verschiedensten Orten differenziert zu messen bzw. herkömmliche Produkte an Empfindlichkeit und Vielfalt der detektierbaren Substanzen übertreffen. Nanobiosysteme erlauben es, solche Verbesserungen zu erzielen (VDI-TZ 2002).

Der Einsatz von Nanosensorik im menschlichen Körper würde sich vermutlich auf das Gesundheitswesen auswirken: Durch breiten Einsatz von Nanosensoren könnten präventive Maßnahmen gegenüber kurativen Maßnahmen an Bedeutung gewinnen. Die systematische Überwachung einer großen Anzahl von Patienten erfordert eine entsprechende Informations- und Kommunikationsinfrastruktur. Die Entwicklung der Telemedizin würde voraussichtlich gefördert.

Inwiefern die Kosten des breiten Einsatzes von Nanosensorik auch durch einen entsprechenden Nutzen gerechtfertig sind, müsste noch überprüft werden. Einsparungen ließen sich eventuell durch stärkere Prävention und Früherkennung von Krankheiten erzielen. Mehrkosten können dadurch entstehen, dass vermehrt Abweichungen vom Normalzustand behandelt werden, die zuvor unbemerkt und folgenlos geblieben wären. Die weitere Entwicklung in Richtung einer individualisierten Medizin würde unterstützt.

Mithilfe von Nanosensoren kann potenziell eine große Vielfalt besonders sensibler Gesundheitsdaten erhoben werden. Damit stellen sich neue Herausforderungen an den Datenschutz.

Beispiele

Das Unternehmen GeneScan in Freiburg i. Br. bietet seit Mai 2002 einen DNA-Chip für den Bereich der Pharmakogenetik an, der dazu beiträgt, individuelle Unterschiede bei der Reaktion auf Medikamente zu erkennen. Die Firma Febit in Mannheim bestückt DNA-Chips nach den spezifischen Wünschen der Anwender mit DNA-Sonden. Andere Firmen haben Chips entwickelt, die eine differenzierte Diagnose von Erbkrankheiten oder spezifischen Ausprägungen von Krebs ermöglichen, die Erstellung genetischer Fingerabdrücke vereinfachen oder Unterstützung bei der Diagnose von Infektionskrankheiten bieten (Lang 2002).

Mit der Entwicklung von Nanosensoren für die „vor-Ort“-Analytik im intakten Organismus mit universellem Einsatzgebiet von der Phytopathologie bis zur Medizin beschäftigt sich die Arbeitsgruppe um Prof. H. Felle, Universität Gießen. Das Projekt wird gefördert im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme Nanobiotechnologie.

Die Entwicklung eines Affinitätssensors auf der Basis von Rasterkraftmikroskop-Cantilevern ist Ziel der Arbeitsgruppe von Prof. Ch. Ziegler, Universität Kaiserslautern. Gefördert wird dieses Vorhaben von der DFG.

2.2 Biologische Wirkstoffe

2.2.1 Transport biologischer Wirkstoffe

Bisher werden viele Medikamente vor allem über den Blutkreislauf unspezifisch im gesamten Körper verteilt, obwohl sie nur in einem bestimmten Organ oder Gewebe wirksam werden sollen. Die verabreichten Wirkstoffmengen sind daher zumeist verhältnismäßig hoch, Nebenwirkungen werden hervorgerufen, die sich bei gezielterer Verabreichung wahrscheinlich vermeiden ließen. Andere Wirkstoffe werden durch körpereigene Abwehrmechanismen daran gehindert, ihr Ziel zu erreichen. Zudem können Wirkstoffe während ihres Weges durch den Körper

durch Abbau und Zerfall ihre Wirksamkeit teilweise oder vollständig verlieren.

International werden in zahlreichen Projekten Nanopartikel untersucht, die dem Transport von bioaktiven Wirkstoffen dienen. Diese Nanopartikel können beispielsweise den Wirkstoff vor frühzeitigem Abbau oder Zerfall schützen, indem sie ihn umschließen. Sie sind teilweise in der Lage, gezielt an bestimmte Zellen zu binden, und durchdringen biologische Barrieren, wie etwa die Blut-Hirn-Schranke oder Zellmembranen. Im Experiment konnte gezeigt werden, dass bestimmte Nanopartikel gut geeignet sind, Proteine über die Nasenschleimhaut in das Blut oder das lymphatische System zu transportieren. Durch Verabreichung in Form von Nanoemulsionen konnte die Wirksamkeit verschiedener entzündungshemmender Medikamente und von Lokalanästhetika gesteigert werden (Jansen/Maibach 2001). Als kritischer Faktor bei der Formulierung neuartiger Arzneimittel mit Nanopartikeln gilt heute die Verpackungsrate der Wirkstoffmoleküle.

Nachfrage und Perspektiven

Es besteht ein erheblicher Bedarf an Vehikeln, die biologische Wirkstoffe, vor allem Medikamente, effizient zu ihrem Ziel transportieren und vielfach auch einen Schutzmantel bilden, der instabile Moleküle vor frühzeitigem Abbau oder Zerfall bewahrt. Nanopartikel können aufgrund ihrer Größe biologische Barrieren, wie z. B. Zellmembranen, verhältnismäßig leicht durchdringen und stellen daher geeignete Transportsysteme für Wirkstoffmoleküle dar, die eine gewisse Größe nicht überschreiten. An solcherart kolloidalen Arzneiformen wird bereits seit ungefähr 30 Jahren mit Erfolg gearbeitet. Wurden bisher vor allem Partikel mit Durchmessern zwischen 100 und 500 nm eingesetzt, so werden heute zunehmend auch kleinere Teilchen evaluiert (Lehr 2002). Der Übergang zum Nanomaßstab ist nicht mit sprunghaft steigenden technologischen Anforderungen verbunden. Die verwendeten Partikel sind vielfach bereits kommerziell erhältlich und werden aus bewährten Zusatzstoffen für Medikamente hergestellt.

Die erfolgreiche Anwendung nanopartikulärer Transportsysteme könnte zu Fortschritten bei der medikamentösen Behandlung und beim therapeutischen Gentransfer beitragen. Vor allem im Bereich der Gentherapie wird zurzeit der Einsatz viraler Transportsysteme erprobt, klinische Studien wurden durchgeführt. Zu dieser Methode könnten nanopartikuläre Transportsysteme eine Ergänzung bzw. eine Alternative darstellen. Ähnlich wie bei der Einführung neuer Medikamente lassen sich jedoch auch bei der Anwendung neuer Transportsysteme bislang unbekannte gesundheitliche Risiken nicht ausschließen. Neben Nanopartikeln könnten längerfristig auch andere Transportsysteme zum Einsatz kommen, etwa Nanomaschinen, die sich aktiv im menschlichen Körper bewegen. Die Machbarkeit solcher Systeme ist derzeit hypothetisch und nicht geklärt.

Beispiele

Beim Transport von Medikamenten mithilfe von Nanopartikeln sind europäische Arbeitsgruppen weltweit führend (Lehr 2002). Für Deutschland seien beispielsweise folgende Projekte genannt:

An oberflächenmodifizierten nanopartikulären Trägern auf Silica-Basis für den somatischen Gentransfer forschen die Arbeitsgruppe um Prof. C.-M. Lehr und E. Haltner, Biopharmazie und Pharmazeutische Technologie, Universität des Saarlandes, und die Firma Across Barriers, Saarbrücken. Eine Förderung erfolgte in den Jahren 2000 bis 2002 durch das BMBF.

Die Überwindung der Blut-Hirn-Schranke durch Nanopartikel ist Forschungsgegenstand von Prof. J. Kreuter an der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main, ebenfalls ein Projekt im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme Nanobiotechnologie.

Das Thema Magnetofection – Magnetische Nanovehikel für die Gentherapie – ist Forschungsobjekt von Ch. Bergemann, chemicell GmbH, Berlin. Auch dieses Projekt läuft im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme Nanobiotechnologie.

2.2.2 Dosierung biologischer Wirkstoffe

Nanopartikel lassen sich nicht nur zum Transport und Schutz biologischer Wirkstoffe einsetzen, sondern sind auch geeignet, solche Wirkstoffe über Zeiträume bis zu mehreren Monaten dosiert freizusetzen. Insbesondere wird an Vehikeln gearbeitet, die in der Lage sind, auf körpereigene Signale zu reagieren.

Nachfrage und Perspektiven

In der Medizin besteht Bedarf an Dosiersystemen, die bioaktive Wirkstoffe kontrolliert abgeben, für Patienten und Behandelnde gut zu handhaben sind und ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis aufweisen. Ein erheblicher Fortschritt gegenüber den meisten heute verwendeten Verfahren würde erzielt, wenn es gelänge, die Wirkstoffe als Antwort auf körpereigene Signale differenziert freizusetzen.

Zurzeit werden biologische Dosiersysteme entwickelt. Schilddrüsenzellen oder Inselzellen der Bauchspeicheldrüse beispielsweise werden heute bereits in teildurchlässige Hüllen verkapselt implantiert. Im Körper der so behandelten Patienten produzieren sie die zuvor fehlenden Hormone. Die Verkapselung verhindert, dass eine Immunantwort ausgelöst wird. Die teildurchlässige Hülle ermöglicht jedoch eine gewisse Regulierung der Hormonproduktion durch körpereigene Signale des Patienten und die Freisetzung der Wirkstoffe in den Körper des Implantatempfängers.

Eine wesentliche Ergänzung bzw. Verbesserung dieser Therapieansätze könnten nanobasierte Mikropumpen darstellen. Schon heute sind diese Mikropumpen in der Lage, geringste Wirkstoffmengen zeitgenau am relevanten Wirkungsort in genauester Dosierung abzugeben. Ende 2004 soll eine kleine und damit für die Patienten komfortable Pumpe auf den Markt gelangen, die Insulin verabreicht. Die Verbindung dieser Pumpe mit einem Biochip, der kontinuierlich den Blutzuckerspiegel überwacht, wird

geprüft (Speicher 2002). Intensiv wird zudem auch an implantierbaren Chemotherapiesystemen im Nanomaßstab geforscht (Jankowski 2001).

Neben dem Einsatz in der Humanmedizin besteht auch in der Veterinärmedizin und Landwirtschaft Nachfrage nach fortgeschrittenen Verfahren zur Wirkstoffdosierung.

Die nanopartikulären Dosiersysteme weisen noch ein erhebliches Entwicklungspotenzial auf. Das gilt insbesondere für Nanopartikel, die auf spezifische Signale im Körper der Patienten reagieren. Außer Nanopartikeln könnten auch nanolektronische Dosiersysteme Verwendung finden. Neue gesundheitliche Risiken lassen sich nicht ausschließen, vor allem in der Einführungsphase neuer Dosiersysteme. Eine aktuelle Befragung deutet darauf hin, dass einige Experten bis zum Jahr 2010, die Mehrheit dagegen bis zum Jahr 2020 einen Durchbruch bei der zielgerichteten und dosierten nanotechnologischen Medikamentenabgabe erwarten (basics 2002).

Beispiele

An einer bioaktiven Ausrüstung von Metallimplantatoberflächen arbeitet das Team von D. Klee und J. Salber, gefördert durch das Kompetenzzentrum für Biowerkstoffe Aachen, das BMBF und die DFG. Im Rahmen dieses Projekts wird auch die Anbindung von Nanopartikeln, die Wirkstoffe dosiert freisetzen, an die Oberflächen von Implantaten untersucht.

An effektiven Systemen für den Transport von Medikamenten arbeitet auch der Pharmakonzern Schering. Dort werden aus Lecithinen und stabilisierenden Proteinen Kapseln gefertigt, die nur wenige nm groß sind (max. 200 nm). Die Wände der Lecithinkapseln weisen winzige Poren auf, durch die bestimmte Moleküle in die Kapseln eindringen können. In einer Diabetestherapie etwa käme Blutzucker in die Kapseln hinein, worauf dort Insulin freigesetzt werden würde. Durch die porige Gestaltung der Kapseln ließe sich auch steuern, wann der verpackte Wirkstoff aktiviert und freigesetzt würde (Berliner Zeitung 2003b).

2.3 Medizinische Verfahren und Instrumente

2.3.1 Biomedizinische Nanomaschinen

An der Erforschung und Entwicklung von biomedizinischen Nanomaschinen wird international gearbeitet. Bisher handelt es sich dabei überwiegend noch um reine Grundlagenforschung.

Die Mechanismen, nach denen Maschinen im Nanomaßstab funktionieren, weichen von denjenigen der makroskopischen Welt ab. Biologische Motoren, die als Vorbild für die Konstruktion technischer Motoren gelten, sind in der Regel aus Proteinen zusammengesetzte supramolekulare Einheiten, die Bewegungsenergie aus einer chemischen Reaktion beziehen. Gerichtete Bewegungen sind möglich, obwohl sich die Maschinen in einem Umfeld befinden, das unter anderem aufgrund der so genannten Brown'schen Molekularbewegung stark fluktuiert. Eine der großen Herausforderungen bei der Gestaltung molekularer Maschinen liegt darin, ein System, das durch quantenmechanische Effekte bestimmt wird, zu einem weitgehend klassischen Verhalten zu veranlassen (Joachim/Gimzewski 2001). Ein weiteres Problem liegt häufig auch in der thermischen (In-)Stabilität (Charisius 2000).

Nachfrage und Perspektiven

Im Bereich molekularer Maschinen greift die Nanotechnologie vielfach auf biologische Vorbilder zurück, obwohl die Biologie bisher auch erst wenige Informationen darüber gewonnen hat, wie biologische Motoren im Nanomaßstab arbeiten. Der kleinste bekannte biologische Motor ist die ATP-Synthase (Kelly/Sestelo 2001). Aktuell wird unter anderem an Motoren geforscht, die aus DNA-Molekülen sowie aus Aktin und Myosin bestehen (Kurschat 2002). In biologischen Systemen existieren sowohl Rotoren (z. B. in Form von Bakteriengeißeln) als auch Maschinen, die sich linear bewegen (z. B. Kinesine an Mikrotubuli). Zwei künstlich hergestellte Gruppen von Molekülen, die intensiv im Hinblick auf Nanomotoren untersucht werden, sind die Catenane und Rotaxane. Catenane bestehen aus zwei gegeneinander beweglichen Ringen, Rotaxane aus einem Ring, der sich über ein lineares Molekül bewegt (Kurschat 2002).

Als in absehbarer Zeit realisierbare Nanomaschinen werden sehr kleine, bewegliche Endoskope eingestuft, die mit zusätzlichen Instrumenten, z. B. Greifarmen im Nanomaßstab, ausgestattet werden könnten (Knurhahn/Bodderas 2001). Solche Endoskope würden es erlauben, auch feine Körperstrukturen näher zu untersuchen. Da sie zudem die Belastung für den Patienten vermindern und die mit einer Endoskopie verbundenen Risiken verringern können, ist für solche Geräte eine starke Nachfrage abzusehen.

Prinzipiell ist die physikalisch-technische Realisierbarkeit von Nanomaschinen umstritten. Deren biologische Vorbilder entfalten ihre Wirkung oft nur in einer hochspezifischen Umgebung. Im Rahmen einer Studie des VDI befragte Experten hielten insbesondere die Entwicklung von medizinischen Nanorobotern (Nanobots) für unrealistisch und auch nicht dringend nötig. Verengte Blutgefäße beispielsweise könnten auch mit einem (herkömmlichen) Ballonkatheter geweitet werden. Wichtiger als der Einsatz von Nanomaschinen, die Reparaturarbeiten im Körper vornehmen, sei es, ein besseres Verständnis der molekularen Zusammenhänge von Krankheiten im Körper zu entwickeln (Malanowski 2001).

Sollten jedoch eines Tages tatsächlich Nanomaschinen mit genau definierten Funktionen in großen Mengen kostengünstig hergestellt werden, so würde deren Einsatz vermutlich die Lebenswissenschaften (und hier besonders die Medizin) revolutionieren. Krankheiten könnten möglicherweise bereits in ihren Ansätzen erkannt und behandelt werden, Alters- und Verschleißerscheinungen ließen sich u. U. besser als bisher behandeln. Das Verständnis davon, was ein Organismus ist (und wie mit Lebewesen umgegangen werden kann und soll), würde sich voraussichtlich tief greifend wandeln.

Beispiele

In Deutschland existiert seit 1999 das Schwerpunktprogramm 1068 der DFG „Molekulare Motoren“. Koordinator dieses Projektes ist Prof. B. Brenner, Medizinische Hochschule Hannover. Das Programm stellt eine Grundlage für nanotechnologische Anwendungen dar, ist aber – mit Ausnahme einiger nanoanalytischer Projekte – nicht selbst direkt der Nanotechnologie zuzurechnen.

Forscher der Universität Basel haben jüngst in Zusammenarbeit mit dem IBM-Forschungslabor in Zürich (IBM 2003) einen Nanosensor entwickelt, der zwei Biomarkerproteine im Blutstrom aufspüren soll. Da die Konzentration der beiden relevanten Proteine Kreatinase und Myoglobin einen Hinweis auf eine Schädigung des Herzmuskels darstellt, könnte sich diese Nanomaschine in der Blutbahn eines Menschen möglicherweise als Frühwarnsystem bei Herzinfarkten eignen. Der Sensor besitzt eine Anzahl von jeweils 500 nm starken Auslegern, die auf einer Seite mit Antikörpern für die Proteine beschichtet sind, berichtet das Fachmagazin Nanotechnology. Bindet eines der beiden Proteine an die Antikörper, verbiegt sich der Ausleger. Auf diese Bewegung hin erfolgt ein optisches Signal. Die Proteinerkennung soll innerhalb von zehn Minuten erfolgen (Nanotechweb 2003).

Vor allem Patienten in Intensivstationen soll das System zugute kommen. Da der Nanosensor die Konzentration der Biomarker direkt im Blut misst, soll sich so die Schwere eines Herzinfarktes prospektiv abschätzen lassen. Durch ein detailliertes Wissen über die Proteinkonzentration könnten frühzeitig lebensrettende Maßnahmen für Patienten, die einen akuten Infarkt erleiden, getroffen werden. Die Forscher betonen jedoch, das Warnsystem sei noch längst nicht ausgereift (IOB 2003).

2.3.2 Medizinische Materialien und Implantate

An Materialien für Knochen- und Zahnimplantate wird international intensiv geforscht. Einige Produkte sind bereits auf dem Markt, z. B. das resorbierbare Knochenersatzmaterial Ostim® der Osartis GmbH, Obernburg (Osartis 2002). Bei dem biokompatiblen Titan, das bereits seit einiger Zeit für Knochen- und Zahnimplantate verwendet wird, hat sich gezeigt, dass eine nur wenige nm dicke Schicht an der Oberfläche die Interaktionen mit menschlichen Zellen wesentlich beeinflusst. Diese Wechselwirkungen werden derzeit näher untersucht, mit dem Ziel, maßgeschneiderte Titanimplantate für verschiedene Anwendungen zu produzieren (Koch 2001).

Mithilfe der Nanotechnologie lassen sich zudem Beschichtungen für medizinische Geräte herstellen, die beispielsweise antimikrobiell wirken, kaum verschmutzen oder leicht zu reinigen sind und Korrosion bei der Sterilisation oder Desinfektion verhindern. Solche Beschichtungen werden in der Praxis bereits verwendet (nanomedX 2002).

Nachfrage und Perspektiven

In der Medizin sind vor allem zwei Typen von Materialeigenschaften gesucht: Materialien, die mit biologischem Gewebe interagieren, z. B. für Knochenimplantate, und teilweise auch biologisch resorbierbar sind, sowie Materialien, die möglichst wenig mit anderen Substanzen und Strukturen in Wechselwirkungen treten, z. B. für medizinische Instrumente, die nicht verschmutzen (Bernstein et al. 2001). In beiden Bereichen besteht für viele der heute verwendeten Produkte noch ein deutliches Verbesserungspotenzial, sodass hier eine entsprechende Nachfrage für Nanomaterialien zu erwarten ist.

Der Einsatz von Implantaten in der Medizin gewinnt allgemein an Bedeutung. Im Zeitraum von 1986 bis 1996 hat z. B. die Anzahl der in Deutschland durchgeführten Erweiterungen der Herzkranzgefäße um etwa das 20fache zugenommen. Die Zahl der zur Stabilisierung der erweiterten Gefäße eingeführten so genannten Stents wuchs in den letzten Jahren entsprechend rasch an (Klee/Salber 2002).

Nanomaterialien weisen gegenüber anderen Werkstoffen den Vorteil auf, dass sich ihre Wechselwirkungen mit der biologischen Umgebung gezielt einstellen und beeinflussen lassen (Price et al. 2002). In den kommenden Jahren werden Nanomaterialien voraussichtlich vor allem bei medizinischen Instrumenten sowie bei Knochen- und Zahnimplantaten zunehmend Verwendung finden. Damit setzt sich eine bereits begonnene Entwicklung fort.

Die in einer Studie des VDI befragten Experten sehen in näherer Zukunft vor allem materialtechnische Anwendungen der Nanotechnologie als realistisch an, die Entwicklung spezieller Membranen und medizinischer Klebeflächen, z. B. für den körperinneren Wundverschluss (Malanowski 2001).

Mittelfristig können Nanomaterialien als Transplantate, z. B. als künstliche Haut, zum Einsatz kommen oder den Aufbau solcher Transplantate aus Zellkulturen unterstützen. Diese Entwicklung setzt einerseits ein vertieftes Verständnis biologischer Prozesse auf molekularer Ebene und andererseits Fortschritte bei der Produktion von Nanomaterialien voraus (Roco/Bainbridge 2001). Auch Synergien zwischen Stammzelltherapie und Nanotechnologie sind denkbar, indem Nanotechnikmaterialien ein Gerüst bilden, das den Aufbau neuen Gewebes mithilfe von Stammzellen ermöglicht.

Durch Verfahren der Nanotechnologie könnte die Biokompatibilität künstlicher Implantate verbessert werden. Zudem wird erwartet, dass Nanoimplantate länger im Körper funktionsfähig bleiben als bisher übliche. Damit könnten sich die Nebenwirkungen für Patienten verringern und Operationen, um abgenutzte Implantate zu ersetzen, würden u. U. überflüssig. Möglicherweise kann dies auch zu Kosteneinsparungen im Gesundheitswesen beitragen.

Mittelfristig werden voraussichtlich nicht nur bestehende Implantate durch verbesserte Nanomodelle ersetzt, sondern auch neue Formen der Implantation möglich werden. Indem Nano- und Biotechnologie zusammenwirken, verwischen sich zum Teil die Grenzen zwischen Implantation und Transplantation. Diskutiert wird beispielsweise, alternde Organe durch frische Organe zu ersetzen, die auf einer nanotechnologischen Matrix mithilfe

körpereigener Stammzellen in vitro neu aufgebaut wurden. Diese Möglichkeiten bergen jedoch auch schwerwiegende Probleme: Könnten alternde, kranke Organe und Gewebe ersetzt werden, würde sich ggf. die Medizin vermehrt zum Reparatur- und Wartungsbetrieb am menschlichen Körper entwickeln. Das gesellschaftliche Menschenbild könnte sich wandeln.

Ein weiteres Entwicklungsgebiet stellen nanoelektronische Neuroimplantate dar, die Schäden an Sinnesorganen oder am Nervensystem kompensieren bzw. die Leistungsfähigkeit dieser Organe erhöhen und das menschliche Wahrnehmungsspektrum verbreitern. International wird bereits intensiv an Mikroimplantaten gearbeitet, die insbesondere die Funktionsfähigkeit von Sehsinn und Gehör wieder herstellen sollen. Durch Fortschritte bei der Nanoinformatik könnten diese Implantate den Dimensionen der natürlichen Systeme und deren Leistungsfähigkeit angenähert werden.

Ein anderes visionäres Ziel, das auch mithilfe der Nanobiotechnologie angestrebt wird, ist die Schaffung von biologisch-technischen Schnittstellen in der Neurotechnologie zur Kopplung von biologischen mit technischen Systemen. Hier wird sowohl an reizsteuerbare Neuroimplantate als auch an direkte Eingabemöglichkeiten für elektronische Hilfsmittel gedacht (VDI/FhG-INT 2002, S. 63).

Neuroimplantate werfen somit in besonderem Maße Fragen nach den Grenzen von Mensch und Maschine bzw. nach der entsprechenden (notwendigen) Grenzziehung auf (vgl. Kapitel IX.3).

Beispiele

Mit der bioaktiven Ausrüstung von Metallimplantatoberflächen beschäftigt sich die Arbeitsgruppe von D. Klee und J. Salber. Die Förderung erfolgt durch das Kompetenzzentrum für Biowerkstoffe Aachen, das BMBF und die DFG.

Gering benetzbare Oberflächenstrukturen und -werkstoffe für künstliche Gefäßstützen und Herzklappen sind Forschungsgegenstand von Prof. R. Thull, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Das Projekt gehört zum Forschungsbereich „Biokompatible Werkstoffe und Fertigungstechniken für Implantate und Implantatkomponenten“ der Universität Würzburg.

Die Entwicklung eines Verbundwerkstoffes mit funktionellen Oberflächenstrukturen (Lotuseffekt) in Kombination mit funktionellen Beschichtungen zur Optimierung der hämokompatiblen bzw. thrombogenen Eigenschaften hat sich Dr. V. Biehl zum Ziel gesetzt. Die Struktur und modifikationsabhängige Einstellung der Grenzflächen an Titanbasiswerkstoffen zum Hartgewebe erforscht Dr. E. Eisenbarth. Beide Wissenschaftler arbeiten am Lehrstuhl für Metallische Werkstoffe (Prof. J. Breme), Universität des Saarlandes. Die Projekte werden seit 2001 durch die DFG gefördert.

2.3.3 Behandlung von Zellen und Geweben

Trotz intensiver Forschung in den letzten Jahrzehnten lassen sich viele Krebserkrankungen noch nicht befriedigend therapieren. Die Nanobiotechnologie könnte – gemeinsam mit anderen Verfahren – eventuell einen Beitrag zu besseren Behandlungserfolgen leisten.

Eine nanobiotechnologische Entwicklung, die das Potenzial hat, sich auf alle konventionellen (Operationen, Strahlen- u. Chemotherapie) wie auch zukünftigen Therapieverfahren (Gen- und Immuntherapie, neue Pharmaka) auszuwirken, ist die Wärmeanwendung mithilfe von Nanopartikeln. An der Berliner Charité wurde in der Arbeitsgruppe von Dr. A. Jordan ein nanobiotechnologisches Verfahren entwickelt, mit dem durch eine spezifische Gestaltung von Nanopartikeloberflächen und einem physikalischen Prinzip, das ausschließlich auf der Nanoebene funktioniert, eine biologisch hochselektive Erwärmung in jeder Region des Körpers möglich ist. Dazu werden Nanoteilchen aus Eisenoxid in eine Form gebracht, in der sie selektiv von Tumorzellen aufgenommen werden und sich fest in das Tumorgewebe einlagern. Beim kontaktlosen Anlegen eines magnetischen Wechselfelds erzeugen die Teilchen Wärme, und die Tumorzellen sterben ab. Die Überreste der Zellen und die verbleibenden Partikel werden vom Körper abgebaut bzw. ausgeschieden. Mit dem inzwischen weltweit unter dem Namen Magnetic Fluid Hyperthermia bekannten Verfahren wurden drei Start-up-Unternehmen in Berlin gegründet. Inzwischen steht das weltweit erste zur klinischen Erprobung zugelassene Therapiegerät, das zusammen mit der mittelständischen Firma FM Elektronik entwickelt wurde, in der Klinik für Strahlenheilkunde der Charité.

Auch die Nanopartikel haben die klinische Reife erreicht und werden in den kommenden Jahren in klinischen Studien in Deutschland, Europa und USA getestet werden. Im Juni 2003 hat die weltweit erste klinische Studie gegen bösartige Hirntumore (Glioblastome) und Hirnmetastasen in einer Kooperation der Charité und dem Bundeswehr-Krankenhaus in Berlin begonnen (Charité 2003). Der Studie vorangegangene Heilversuche sowie die umfangreichen Daten aus dem Labor zeigen eine hohe Wirksamkeit des Verfahrens. Zur Behandlung der Patienten werden fünf bis sechs Nanopartikelanwendungen in Kombination mit Chemo- und Radiotherapie durchgeführt (Brüning 2002).

Seit Anfang 2002 arbeitet die Gruppe um Dr. Jordan im Rahmen des BMBF-Nanobiotechnologieprogramms – zusammen mit dem Institut für Neue Materialien in Saarbrücken und der neu gegründeten Firma MagForce Applications (http://www.magforce.de) – an der Weiterentwicklung der Nanoteilchen als Kombinationspräparat eines Chemotherapeutikum-Trägers, dessen Wirksamkeit erst durch die Erwärmung des Nanopartikels „eingeschaltet“ wird (PTJ 2003). Das von Dr. Jordan gegründete Centrum für biomedizinische Nanotechnologie (CBN) an der Charité in Berlin soll hierzu im Bereich Forschung und Lehre neue Impulse setzen.

Bei einem weiteren Verfahren, an dem zurzeit geforscht wird, werden Nanostrukturen, die selektiv an Krebszellen

binden, mit Radionukliden befrachtet. Diese Radionuklide senden α-Strahlung aus. Tumorzellen sollen dadurch zerstört werden, ohne dass das umliegende Gewebe erheblichen Schaden erleidet (Burnell 2002).

Mit bakteriziden Beschichtungen könnten Infektionen vermieden werden; dies ist insbesondere in Einrichtungen des Gesundheitswesens von großer Bedeutung. Das Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik in St. Ingbert beispielsweise entwickelte eine Beschichtung mit Nanoteilchen, die durch Licht elektronisch angeregt werden und dann in der Lage sind, Zellwände und DNA von Bakterien und Sporen zu zerstören (Nanobionet 2002).

Nachfrage und Perspektiven

In der Human- und Veterinärmedizin besteht großer Bedarf an Therapien, die Tumorzellen oder Krankheitserreger kontrollieren. Dabei sollen unerwünschte Zellen wirksam und möglichst nebenwirkungsfrei vernichtet werden. In der Landwirtschaft werden kostengünstige und effiziente Alternativen zu Pestiziden und Herbiziden gesucht, die Mensch und Umwelt nicht belasten.

Neben der schon erwähnten magnetfeldinduzierten Hyperthermie in der Krebsbehandlung sind auch Gentherapien oder gezielte Behandlungen mit Zellgiften denkbar, bei denen Nanopartikel als tumorspezifische Transportvehikel zum Einsatz kommen. Rasche Erfolge sind allerdings eher unwahrscheinlich, wie Erfahrungen mit anderen Krebstherapien nahe legen.

Die zunehmende Resistenzproblematik macht Alternativen zu Antibiotika erforderlich. Allerdings ist bis heute noch kein aktuelles Forschungsprojekt bekannt, das Nanotechnologie zur Kontrolle von Krankheitserregern im menschlichen oder tierischen Organismus einsetzt. Da es sich um neue Therapieformen handelt, sind im Vorfeld der Zulassung intensive Untersuchungen zu Nebenwirkungen und möglichen Langzeitfolgen erforderlich. Zudem ist genauer zu klären, welchen Anforderungen nanotechnologische Therapien aus rechtlicher Sicht genügen müssen.

Das Gleiche gilt für den Bereich der Pflanzenschutzmittel. Die Perspektiven der Nanotechnologie lassen sich auf diesen Gebieten bisher kaum evaluieren.

Gute Anwendungsprognosen bestehen für bakterizide Beschichtungen, die nicht nur im Gesundheitswesen, sondern auch in öffentlichen Gebäuden und privaten Haushalten Verwendung finden könnten, sofern sie preisgünstig, widerstandsfähig und leicht zu unterhalten sind.

Auch militärische Anwendungen sind denkbar, so etwa der Einsatz mit Toxinen befrachteter Nanopartikel, die Kleidung und Haut durchdringen, als Waffe. Militärische Anwendungen könnten sich jedoch für die Akzeptanz der Nanotechnologie im Allgemeinen u. U. als problematisch und kritisch erweisen.

Beispiele

Als ein Beispiel für international kompetitive Aktivitäten in Deutschland sei an dieser Stelle das Projekt Magnetic Fluid Hyperthermia (MFH) von Dr. A. Jordan an der Charité genannt (s. o.), das seit 1994 im Sonderforschungsbereich 273 „Hyperthermie: Methodik und Klinik“ der DFG und seit 2002 im Nanobiotechnologieprogramm des BMBF gefördert wird. Die daraus hervorgegangenen Spin-Off-Unternehmen und deren patentierte Produkte zeigen, wie die Nanobiotechnologieforschung bereits erste wirtschaftliche Impulse setzen kann.

2.4 Nahrungsmittel

Im Themenfeld Nahrungsmittel und Ernährung zeigen erste Überlegungen, dass mithilfe von Nanobiotechnologie die Stabilität und Lebensdauer von Lebensmitteln verbessert, die Bioverfügbarkeit von wichtigen Inhaltsstoffen erhöht sowie optische Eigenschaften, Geschmack und Konsistenz verändert werden könnten. Durch Beeinflussung physikalischer Eigenschaften wie etwa der Fließfähigkeit von Nahrungsmittelpulvern ließen sich zudem Produktionsprozesse optimieren und Kosten einsparen. Die im Folgenden angeführten Beispiele sollen exemplarisch Methoden und Ziele illustrieren.

Nachfrage und Perspektiven

Es besteht ein gewisser Bedarf an landwirtschaftlichen Hilfsstoffen, welche die Produktion gesunder und wohlschmeckender Lebensmittel unterstützen sollen. Dazu zählen etwa solche Pflanzenschutzmittel, die für den Menschen unschädlich bzw. unter natürlichen Bedingungen vollständig zu unschädlichen Produkten abbaubar sind. Durch schnelle und kostengünstige Analysen von Inhaltsstoffen bei Lebensmitteln könnten gesundheitliche Risiken verringert und das Verbrauchervertrauen in die angebotenen Produkte gestärkt werden.

Entsprechend ist Nachfrage nach geeigneten nanoanalytischen Verfahren zu erwarten. So werden beispielsweise nanoanalytische Methoden unter Verwendung von DNA-Chips für die Untersuchung von Lebensmitteln auf gentechnisch veränderte Bestandteile entwickelt (3sat 2000).

Nanotechnologisch optimierte Herstellungsverfahren und Verpackungsmaterialien könnten die Qualität von Lebensmitteln verbessern. Es sind Verpackungsmaterialien im Gespräch, die den Zustand der verpackten Lebensmittel überwachen und beispielsweise eine Warnung zeigen, wenn die Kühlkette unterbrochen wurde oder ein Nahrungsmittel verdorben ist. Schon heute ermöglichen UV-absorbierende Nanopartikel die Herstellung transparenter Lebensmittelverpackungen, die eine längere Haltbarkeit und Farbechtheit der Lebensmittel gewährleisten. Entsprechende Produkte sind bereits seit einigen Jahren auf dem Markt (Sachtleben 2000).

Die verwendeten Techniken zur Herstellung solcher nanotechnologischer Produkte haben sich bereits teilweise etabliert. Schwer überwindbare technische Hindernisse sind derzeit nicht erkennbar. Bei günstigem Preis-

Leistungs-Verhältnis dürften solche Materialien und Produkte auf eine (hohe) Nachfrage treffen. Beim Functional Food lassen sich Erkenntnisse aus der Pharmazie nutzen, um die den Lebensmitteln beigefügten bioaktiven Substanzen im Körper besser wirksam werden zu lassen. Ob die Verwendung nanotechnologisch hergestellter Zusatzstoffe, die z. B. besondere Farb- und Konsistenzeffekte bewirken, dem Bedürfnis der Verbraucher nach abwechslungsreichen und neuartigen Lebensmittelangeboten tatsächlich entgegen kommt, bleibt zu hinterfragen bzw. abzuwarten.

Nanotechnologische Anwendungen, welche die Zusammensetzung und Beschaffenheit von Lebensmitteln beeinflussen, könnten mit gesundheitlichen Risiken für die Verbraucher verbunden sein. Wenn die natürliche Konsistenz der Nahrungsmittel verändert wird, sind die Konsumenten kaum noch in der Lage, die Produkte mithilfe ihrer Sinne und Erfahrung angemessen zu bewerten.

Beispiele

Die Firma Kraft Foods (USA) richtete bereits 1999 ein eigenes Nanotechnologielabor ein. Seit Anfang 2000 ist das Unternehmen Teil eines Forschungskonsortiums, das auch 15 Universitäten und staatliche Forschungseinrichtungen umfasst, die von Kraft mit Forschungsgeldern unterstützt werden. An der Rutgers University (New Jersey, USA) besteht seit September 2002 der erste Lehrstuhl für Lebensmittelnanotechnologie. Forschungsgebiete sind die maßgeschneiderte Freisetzung von Nährstoffen und Nanosensoren (Gardner 2002).

In Deutschland wird unter der Leitung von Prof. R. Gimbel an der Gerhard-Mercator-Universität in Duisburg ein Projekt zur Kombination von Membrantechnik und Sorption zur Aufbereitung von Elbuferfiltrat als Trinkwasser durchgeführt, gefördert vom BMBF. Im Rahmen dieses Projekts wird auch mit Nanofiltrationstechniken gearbeitet.

2.5 Kosmetik

Indem kosmetische Produkte z. B. wirksam in den Stoffwechsel der Haut eingreifen, nähern sie sich medizinisch-pharmakologischen Produkten an. Überschneidungen liegen vor allem im Bereich der Dermatologie und spiegeln hier auch Unschärfen bei der Definition von Gesundheit und Krankheit wider. Eine wichtige Funktion in der Kosmetik übernehmen Vehikel, die Wirkstoffe zu ihrem Wirkungsort, etwa in tiefere Hautschichten, transportieren. Bei den Wirkstoffen kann es sich z. B. um Vitamine oder UV-Filter handeln. Die Substanzen, aus denen die Vehikel gebildet werden, üben oft selbst eine Wirkung in Haut, Haaren oder Nägeln aus. Liposome etwa bestehen aus Phosphatidylcholin, das die Haut rückfettet und glättet (Zocchi 2001). Zudem können die Vehikel den Wirkstoff vor vorzeitigem Abbau oder Zerfall schützen.

Über die genauen Wirkungsmechanismen der Nanopartikel und Nanoemulsionen ist bisher wenig bekannt. Wirkstoffe sollen mithilfe von Nanopartikeln besser auf und in der Haut verteilt und effektiver abgegeben werden (Jansen/Maibach 2001). Titan- oder Zinkoxidpartikel im Nanomaßstab (etwa 15 bis 20 nm Durchmesser) werden in Sonnenschutzmitteln eingesetzt. Aufgrund ihrer geringen Größe verteilen sie sich dicht und gleichmäßig auf der Haut. Im Gegensatz zu organischen UV-Filtern besitzen sie kein allergenes Potenzial. Die geringe Partikelgröße führt dazu, dass der Sonnenschutz auf der Haut für das menschliche Auge unsichtbar ist und damit auch die optischen Anforderungen an eine Sonnenschutzcreme erfüllt (Münter 2001).

Nachfrage und Perspektiven

Eine hohe Nachfrage besteht insbesondere nach Präparaten, die der Hautalterung entgegenwirken. Viele Unternehmen entwickeln Ansätze, um mit maßgeschneiderten Kosmetika den individuellen Eigenschaften und Bedürfnissen der Kundinnen und Kunden entgegenzukommen.

Nanoemulsionen erlauben es, stabile Produkte mit hohem Lipidgehalt herzustellen, für die aufseiten der Verbraucher eine besonders starke Nachfrage besteht. Nanoemulsionen sind hautverträglicher als viele konventionelle Produkte. Die in ihnen enthaltenen Wirkstoffe werden beim Waschen nicht so leicht aus der Haut entfernt und müssen mit weniger Zusatz- und Konservierungsstoffen geschützt werden, als dies bei herkömmlichen Kosmetika der Fall ist (Lautenschläger 2001).

Generell stellt die Verpackung kosmetischer Wirkstoffe in Nanopartikel und Nanoemulsionen einen viel versprechenden Ansatz dar, um die Wirksamkeit von Kosmetika zu verbessern (Jansen/Maibach 2001). Zudem weisen Sonnenschutzprodukte mit Nanopartikeln nach heutigem Stand der Kenntnis eine höhere Wirksamkeit und bessere Hautverträglichkeit als konventionelle Produkte auf (Münter 2001). Es ist daher zu erwarten, dass Nanopartikel künftig zunehmend in Kosmetika eingesetzt werden.

Mithilfe der Nanotechnologie werden im Bereich der Kosmetik vor allem bestehende Produkte weiter entwickelt. Grundlegend neue Auswirkungen sind in näherer Zukunft kaum zu erwarten. An die Marktzulassung für Kosmetika werden geringere Anforderungen als an die Zulassung von Medikamenten gestellt. Die Einführung neuer kosmetischer Produkte ähnelt letztlich einem Experiment mit einer sehr großen Zahl von Versuchspersonen. Langzeitfolgen werden sich voraussichtlich erst anhand der Erfahrungen der Verbraucherinnen und Verbraucher zeigen.

Gesundheitliche Risiken, die durch nanotechnologische Kosmetika hervorgerufen werden, würden voraussichtlich einen ausgeprägten Vertrauensverlust bei den Verbrauchern nach sich ziehen: Im Vergleich zu medizinischen Produkten wird der Nutzen von Kosmetika, der ein Risiko rechtfertigen könnte, als geringer eingeschätzt. Zudem steht in der Regel für jedes kosmetische Produkt eine breite Palette von Alternativen bereit.

Sowohl im Hinblick auf die Formulierung der Produkte als auch auf deren Verhalten im biologischen Gewebe besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf (Jansen/Maibach 2001).

Kosmetika, die pharmakologische Wirkstoffe enthalten, unterstehen heute teilweise der Gesetzgebung für Arzneimittel. Die Grenzen zwischen Medikamenten und Kosmetika werden zunehmend unscharf. So wurde in den USA der Begriff Cosmeceuticals geprägt, um Kosmetika zu bezeichnen, die (auch) pharmakologisch wirksam sind (Milstein et al. 2001). Die Arzneimittelgesetzgebung stellt im Vergleich zur Regulierung im Bereich der Kosmetika ein höheres Schutzniveau für die Verbraucher sicher. Da Nanoprodukte zur höheren Wirksamkeit von Kosmetika beitragen, könnten sich Anpassungen der Regulierung im Bereich der Kosmetika an die Arzneimittelgesetzgebung als notwendig erweisen.

Beispiele

Nanoemulsionen sind unter verschiedenen Produktbezeichnungen kommerziell schon heute erhältlich, zahlreiche Patente wurden vergeben (Buchmann 2001; Jansen/Maibach 2001). Bei der Anzahl eigener nanotechnologiebasierter Patente nimmt das französische Unternehmen L'Oreal weltweit eine Spitzenstellung ein (3i 2002).

Sonnenschutzcremes mit Nanopartikeln werden unter anderem von der Firma Beiersdorf, Hamburg, entwickelt. Die Sachtleben Chemie GmbH, Duisburg, und die Merck KGaA, Darmstadt, bieten gemeinsam verschiedene Titandioxidpulver-Qualitäten im Nanomaßstab für kosmetische Produkte an.

2.6 Biomimetik

Biomimetik, auch als Biomimikry bezeichnet, befasst sich mit dem Verständnis biologischer Funktionsmechanismen und der technischen Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse. Biomimetik fördert den Aufbau von Nanostrukturen nach dem Bottom-up-Ansatz – im Gegensatz zum bisher in der Nanotechnologie vorherrschenden Top-down-Ansatz.

Viren beispielsweise sind unter anderem deshalb in der Lage, ihr Erbgut effizient in Wirtszellen einzuschleusen, weil virale Hüllproteine differenziert auf unterschiedliche Umgebungseigenschaften an der Zelloberfläche und innerhalb der Zelle reagieren. Diese Eigenschaften sollen mit nanobiomimetischen DNA-Vektoren auch für die Gentechnologie und Gentherapie verfügbar gemacht werden (Saxl 2002). Gentechnologie und Biotechnologie allgemein sind weitgehend biomimetisch ausgerichtet. Auch die molekulare und supramolekulare Chemie macht sich Eigenschaften biologischer Moleküle zu Nutze.

Zur Schaffung nanoskaliger Muster und von Ultrafiltrationsmembranen, die keinen höheren Temperaturen und Drücken widerstehen müssen, wird versucht, sich die so genannten bakteriellen S-Schichten nutzbar zu machen. Bei diesen S-Schichten handelt es sich um zweidimensionale kristalline Oberflächenstrukturen in der Zellhülle, die aus regelmäßig angeordneten Membranproteinen bestehen (VDI-TZ 2002).

Auch Eigenschaften anderer Biomoleküle können genutzt werden, um Nanostrukturen herzustellen. Materialwissenschaftler des Air Force Research Laboratory und der University of Cincinnati verwendeten beispielsweise Peptide aus Kieselalgen, die Nanokügelchen aus Polykieselsäure bilden, um optische Gitter zu erzeugen (FAZ 2002a).

Nachfrage und Perspektiven

Biologische Systeme wurden im Verlauf der Evolution auf bestimmte Funktionen hin optimiert. Diese Optimierung kann technischen Systemen zugute kommen. Für biomimetische Nanotechnologie besteht ein breites Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten, die – vorteilhafte Eigenschaften und ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis neu entwickelter Produkte vorausgesetzt – auch eine entsprechende Nachfrage erwarten lassen.

Biomimetische Nanotechnologie ist besonders für Anwendungen im Bereich der Lebenswissenschaften geeignet. Da sie sich Funktionen biologischer Strukturen zunutze macht, werden diese Funktionen meistens auch in ihrer angestammten Umgebung, d. h. in biologischen Systemen, am besten zum Tragen kommen. Die konventionelle Biomimetik blickt bereits auf eine längere Geschichte als die biomimetische Nanotechnologie zurück. Trotz einzelner Erfolge hat sie jedoch in der Technik bisher keine durchgreifenden Erfolge erzielt.

Potenzielle Vorteile der biomimetischen Nanotechnologie gegenüber konkurrierenden Verfahren sind beispielsweise:

- geringe Entwicklungs- und Lernkosten durch Rückgriff auf ausgereifte natürliche Vorgänge,
- umweltfreundliche, ressourcenschonende Herstellung durch Nutzung von Selbstorganisationsprozessen,
- Fehlerfreundlichkeit der Produkte in Analogie zu natürlichen Systemen,
- Synergien mit Verfahren der Bio- und Gentechnologie.

Beispiele

Die biomimetische Forschung im Bereich Nanotechnologie ist vielfältig. An der Universität Marburg (Arbeitsgruppe von Prof. Dr. N. Hampp) etwa wird gemeinsam mit der Munich Innovative Biomaterials GmbH, Planegg-Martinsried, und der Agfa-Gevaert AG, Leverkusen, an Anwendungen des biologischen Farbstoffs Bakteriorhodopsin gearbeitet. Bakteriorhodopsin kommt natürlicherweise beispielsweise in der Zellwand des Bakteriums Halobacterium salinarium vor. Bei Lichteinstrahlung transportiert es Protonen über die Zellmembran und setzt damit Lichtenergie in chemisch-osmotische Energie um. In nanotechnologischen Anwendungen kann es als optischer Datenspeicher und Sicherheitspigment genutzt werden.

Die Hemoteq GmbH, Würselen, bietet eine nanotechnologische Beschichtung, Camouflage®, für medizinische Geräte an, die Oberflächeneigenschaften roter Blutkörperchen imitiert. Damit wird die Blutgerinnung nicht aktiviert, auf die Verwendung gerinnungshemmender Medikamente kann teilweise verzichtet werden. Hemoteq

ist als Spin-off-Unternehmen aus der RWTH Aachen hervorgegangen (Earlybird 2002).

SusTech, Darmstadt, wird von der Henkel KGaA sowie von einigen Hochschulprofessoren und der TU Darmstadt gemeinsam betrieben. Die Firma erforscht die natürliche Entstehung von Zähnen und Knochen und ist bestrebt, die Mineralisation biomimetisch mit chemischen Methoden nachzubilden. Auf dieser Grundlage sollen nicht nur Produkte für die Zahnmedizin, sondern auch für technische Anwendungen entstehen (SusTech 2002).

Am Max-Planck-Institut für Strahlenchemie in Mülheim an der Ruhr wurde in der zweiten Hälfte der 90er-Jahre an biomimetischen Lichtsammelsystemen gearbeitet, die aus Zinkchlorin und einer Fulleren-Bakteriochlorin-Verbindung bestehen. Analog zur natürlichen Photosynthese sollen diese Systeme Photonen einfangen und zu einem Reaktionssystem weiterleiten, wo die Lichtenergie in chemische Energie umgewandelt werden kann (VDI-TZ 2002).

2.7 Bioinformatik und molekulare Computer

Die Forschung im Bereich der Lebenswissenschaften liefert heute umfangreiche Mengen an Daten und Informationen über biologische Strukturen und deren Wechselwirkungen. Damit werden Grundlagen geschaffen, um biologische Prozesse mit wachsender Zuverlässigkeit zu simulieren. Anwendungsmöglichkeiten liegen vor allem bei der Suche nach Wirkstoffen für Medizin, Kosmetik und Pflanzenschutz und bei der Entwicklung biokompatibler und biofunktionaler Implantate. Simulationen könnten es erlauben, aufwendige Tests an Gewebekulturen oder Versuchstieren einzusparen. Weitere Anwendungsgebiete sind möglich. So tragen Simulationen beispielsweise bereits heute dazu bei, die Funktionen komplexer Ökosysteme oder menschliche Problemlösungsstrategien besser zu verstehen. Das Anwendungsspektrum könnte in Zukunft noch erheblich erweitert werden.

Nanotechnologiebasierte Computer, deren Leistungsfähigkeit und Einsatzbreite diejenige konventioneller Computer erreichen oder übertreffen und die damit eine verbesserte Modellierung biologischer Systeme ermöglichen würden, existieren bislang nicht. Im Zeitraum von 2005 bis 2010 wird die fortschreitende Top-down-Miniaturisierung in der Informationstechnik jedoch voraussichtlich die Grenze zur Nanotechnologie überschreiten. Eine Bottom-up-Nanosystemtechnik wird wahrscheinlich erst im darauf folgenden Jahrzehnt erreicht (Friedewald et al. 2002; s. auch Kapitel VI). Computer, deren Leistungsfähigkeit mithilfe der Nanotechnologie gesteigert wurde, sollen dann realitätsnahe Simulationen komplexer biologischer Vorgänge ermöglichen (Roco/Bainbridge 2001).

Zur verbesserten Modellierung biologischer Systeme kommen in absehbarer Zeit vermutlich zunächst Computersysteme infrage, die auf elektronischer, chemischer, biochemischer oder mechanischer Grundlage arbeiten. So lassen sich Biomoleküle in verschiedenen Teilbereichen der Informations- und Kommunikationstechnologie anwenden (VDI-TZ 2002), indem sie

– den Aufbau einer molekularen Architektur unterstützen,

– als Bausteine molekularer Architekturen dienen,

– Funktionen in elektronischen Bauelementen übernehmen und

– als Datenspeicher fungieren.

Molekulare Computer können sowohl nach dem Vorbild herkömmlicher, siliziumbasierter Maschinen konzipiert werden als auch neuartige Architekturen aufweisen. Bei klassischen Architekturen werden die chemische Reaktivität, elektromagnetische Eigenschaften, Fluoreszenz oder Variationen in der Konformation von Molekülen für logische Operationen genutzt. Dabei kann es sich um biologische Moleküle wie z. B. Bakteriorhodopsin handeln. Untereinander lassen sich die Moleküle beispielsweise durch Nanodrähte oder Nanoröhrchen aus Kohlenstoff verbinden. Obwohl die Forschung von der Entwicklung marktreifer Produkte noch weit entfernt ist, investieren insbesondere große international tätige Unternehmen wie IBM in die Entwicklung molekularer Computer (Pease/Stoddart 2001).

Die Möglichkeit, DNA-Moleküle selbst zur Informationsverarbeitung einzusetzen, wird unter dem Begriff DNA-Computing vor allem in den USA und Israel erforscht (Kapitel VI.5.1). DNA-Computing ist ein grundsätzlich neuartiger Ansatz zur Datenverarbeitung. Eine typische Möglichkeit zur Realisierung stellt ein massiver paralleler kombinatorischer Reaktionsprozess dar, der sich biochemische Eigenschaften der DNA, insbesondere die Hybridisierung komplementärer Basenfolgen, zunutze macht. Mithilfe von DNA-Fragmenten werden z. B. sämtliche Lösungen eines geeigneten, durch Wahl der Basenabfolgen programmierten Problems generiert. Bisher wurde mit Rechnermodellen für spezifische Aufgaben experimentiert (FhG-ISI 2002a). Zudem konnten in DNA-Molekülen kodierte Nachrichten übermittelt werden (Niemeyer 2002).

Neben dem direkten Einsatz für informatische Zwecke werden Biomoleküle auch genutzt, um Bausteine im Nanometermaßstab, z. B. auf elektronischen Chips, präzise anzuordnen. Eine wichtige Rolle spielt dabei die verhältnismäßig stabile DNA (Charisius 2000), daneben werden aber auch andere Biomoleküle eingesetzt. Ferritin beispielsweise ermöglicht es, dichte Muster magnetischer Domänen zu erzeugen (Donner 2002).

Eine technische Nutzung des DNA-Computing ist vor allem aufgrund der mit relativ hohem labortechnischen Aufwand verbundenen Schreib- bzw. Leseprozedur für die Daten – wie bei den molekularen Computern klassischer Architektur – kurz- bis mittelfristig nicht absehbar (FhG-ISI 2002a).

Nachfrage und Perspektiven

Die Nachfrage nach zunehmend leistungsfähiger Informationstechnik wird in Zukunft weiter anhalten. Die Vision des Ubiquitous Computing sieht vor, dass Mikrocomputer das Alltagsleben insgesamt durchdringen. Dabei sind Produkte der Nanotechnologie unabdingbar (FhG-ISI 2002a), unter anderem, da die Miniaturisierung siliziumbasierter Computerchips ihren physikalisch bedingten Grenzen zustrebt (Pease/Stoddart 2001). Die zunehmend unwirtschaftlichen Engineering-down-Ver-

fahren zur weiteren Größenverminderung von Mikrosystemen müssen durch günstigere Engineering-up-Methoden ergänzt bzw. ersetzt werden (Niemeyer 2002).

Hohe Speicherdichte, massiv parallele Informationsverarbeitung und Energieeffizienz sind Eigenschaften, welche die Weiterentwicklung des DNA-Computing begünstigen. Bisher weitgehend ungelöste Probleme sind jedoch die inhärente Fehlerhaftigkeit von DNA-Rechenoperationen, vor allem durch Fehlhybridisierung von DNA-Strängen, und die beschränkte Zahl von Operationen, bei denen DNA-Computer eine hohe Rechenkraft erzielen. Anwendungspotenziale des DNA-Computing werden daher vor allem in Rechenanlagen gesehen, die lebenden Organismen implantiert werden. Zudem sind kryptographische Anwendungen denkbar (FhG-ISI 2002a).

Leistungsfähigere, nanotechnologiebasierte Computer ermöglichen eine verbesserte Modellierung biologischer Prozesse. Dadurch könnte sich die Forschung im Bereich der Lebenswissenschaften verändern. Durch aussagekräftige Modellierungen wird das Verständnis biologischer Prozesse gefördert.

Medikamente und Agrochemikalien lassen sich eventuell schneller und kostengünstiger entwickeln und zur Marktreife bringen. Bereits bekannte Wirksubstanzen könnten systematisch optimiert werden, in den angewandten Biowissenschaften könnten vermehrt effektive und effiziente Produkte und Verfahren gestaltet werden. In der Medizin würde der Trend zu gezielten, hochwirksamen und individualisierten Behandlungen unterstützt. Experimente und systematische Testverfahren würden vermehrt durch Berechnungen ersetzt. Veränderte berufliche Anforderungen an Chemiker, Pharmazeuten u. a. wären absehbar.

Leistungsfähigere Computer unterstützen auch die Verbreitung von Netzwerken kleiner kostengünstiger Maschinen. Ubiquitous Computing kann das Alltagsleben tief greifend verändern. In den Lebenswissenschaften würde sich diese Entwicklung voraussichtlich u. a. in einer zunehmenden Verbreitung telemedizinischer Gesundheitsüberwachung niederschlagen.

Beispiele

„Multifunktionale optische Sicherungssysteme auf der Basis von Bakteriorhodopsin“ lautet das Forschungsvorhaben von Prof. N. Hampp, Universität Marburg. Das Projekt wird unterstützt durch die BMBF-Fördermaßnahme Nanobiotechnologie.

Verschiedene Projekte zum DNA-Computing gestaltet die Arbeitsgruppe um Prof. J. S. McCascill, BioMIP, Fraunhofer-Forschungseinheit für Biomolekulare Informationsverarbeitung, St. Augustin.

Forscher des israelischen Weizmann Institutes (http://www.weizmann.ac.il) haben unter der Leitung von E. Shapiro jüngst einen Computer konstruiert, der nicht nur für seine Recheninformationen, sondern auch zur Energieversorgung DNA benutzt, berichtet das Fachblatt PNAS (http://www.pnas.org). Bislang nutzten Vorläufer des DNA-Computers das Molekül ATP (Adenosintriphosphat) als Energiequelle. Konkret verbinden sich bei jedem Rechenschritt zwei komplementäre DNA-Moleküle, ein Input- und ein Softwaremolekül. Auf enzymatischen Weg bricht das Softwaremolekül zwei DNA-Brücken des Inputmoleküls. Die als Wärme in den Brücken gespeicherte Energie wird frei und treibt den Rechenprozess voran. Dieser Vorgang stellt genügend Energie bereit, um Rechnungen ohne jede äußere Energiequelle abschließen zu können. Die Rechenoperationen sind dabei laut seinen Entwicklern zu 99,9 % pro Schritt genau. Insgesamt könnte das Modell mit 5 ml Flüssigkeit 330 Mrd. Rechenoperationen in der Sekunde ausführen (Yahoo 2003).

2.8 Erwartungen und Prognosen

Nanotechnologie und Lebenswissenschaften stellen ein weites Feld für Forschung und Entwicklung dar. Sowohl international als auch in Deutschland wird an einer Vielzahl von Projekten gearbeitet. Einige Anwendungen sind bereits auf dem Markt. Viele Vorhaben sind jedoch noch weit von einer Umsetzung entfernt.

Zwei in jüngster Zeit durchgeführte Expertenbefragungen (3i 2002; Malanowski 2001) zeigen, dass marktfähige Produkte in näherer Zukunft vor allem auf folgenden Gebieten erwartet werden: materialtechnische Anwendungen; medizinische Klebeflächen, z. B. körperinnerer Wundverschluss; Membranen für besondere Anwendungen, vor allem Dialysemembranen; künstliche Implantate für Knochen und Organe; persönliche Gesundheitsdiagnostik.

Das höchste Innovationspotenzial wurde Start-ups zugetraut, die vor staatlichen Forschungseinrichtungen und Großunternehmen rangierten (3i 2002). Als wichtige potenzielle Hemmnisse für kommerzielle nanotechnologische Anwendungen wurden genannt:

- schlecht koordinierte Forschung;
- schlecht koordinierte universitäre Ausbildung;
- mangelnde Fähigkeit, kommerzielle Anwendungsmöglichkeiten von Forschungsergebnissen zu erkennen;
- geringe Forschungsaktivitäten und strukturelle Veränderungen in Unternehmen;
- Mangel an geeigneten Zulieferern;
- hohe Entwicklungs- bzw. Herstellungskosten;
- hohe Kosten von Nanomaterialien;
- mangelnde Fähigkeit, Nanoprodukte in Mengen herzustellen;
- Konkurrenz durch alternative Entwicklungen;
- Verstöße gegen Bestimmungen zum Schutz von Mensch und Umwelt.

Die Tabelle 14, S. 128 enthält zum einen eine Übersicht über die Einschätzungen des aktuellen Entwicklungsstandes der in Kapitel VII.2 beschriebenen Anwendungsgebiete, darüber hinaus Entwicklungsprognosen für das Jahr 2020, die u. a. auf der Einschätzung konkurrierender Technologien und solcher, mit denen Synergien bestehen, beruhen.

Tabelle 14

Internationaler Entwicklungsstand 2002

Anwendungsbereich	**Internationaler Entwicklungsstand 2002**				
	einzelne Projekte der Grundlagenforschung	**zahlreiche Forschungsprojekte**	**anwendungsreife Forschungsergebnisse**	**erste Produkte auf dem Markt**	**nennenswerter Marktanteil**
mikroskopische Untersuchung biologischer Objekte					
	Kommentar: vor allem Rastersondenmikroskopie				
Modellierung biologischer Strukturen und Prozesse					
	Kommentar: Nanoinformatik noch nicht existent				
Diagnostik und Analyse an biologischen Systemen					
	Kommentar: vor allem Lab-on-a-Chip-Technologie, Quantenpunkte, Kontrastmittel				
Produktion biologischer Wirkstoffe					
	Kommentar: starke Konkurrenz durch Biotechnologie				
Transport biologischer Wirkstoffe					
	Kommentar: vor allem Nanopartikel. Kosmetische Anwendungen sind hier ausgeschlossen und werden weiter unten separat aufgeführt.				
Dosierung biologischer Wirkstoffe					
	Kommentar: vor allem Nanopartikel				
Steuerung biologischer Prozesse					
	Kommentar: starke Konkurrenz durch Biotechnologie				
Zerstörung biologischen Gewebes					
	Kommentar: erste klinische Studien zur Krebstherapie				
Implantate und medizinische Instrumente					
	Kommentar: Nutzung nanotechnologischer Beschichtungen mit unterschiedlichen, auch kombinierbaren Oberflächeneigenschaften				
Ernährung					
	Kommentar: Anwendung vor allem bei Verpackungen und Lebensmittelfarbstoffen				
Kosmetik					
	Kommentar: z. B. Sonnenschutzmittel, Hautcremes				
Nanomaschinen					
	Kommentar: noch keine allgemein akzeptierte Definition einer Nanomaschine in Gebrauch				
Biomoleküle für informatische Zwecke					
	Kommentar: vor allem Nutzung von Biomolekülen zu Sicherungszwecken bereits weit entwickelt				
Biomimetik					
	Kommentar: breites Spektrum von Forschungsgebieten und möglichen Anwendungen				

Tabelle 14

Fortsetzung: „Umfeld und wirtschaftliches Potenzial“

Anwendungsbereich	Umfeld und wirtschaftliches Potenzial		
	wichtige Synergien	wichtige Konkurrenten	Einschätzung des absoluten wirtschaftlichen Potenzials
mikroskopische Untersuchung biologischer Objekte		neue Verfahren der Lichtmikroskopie, Kernspinresonanzspektroskopie, Röntgenstrukturanalyse, Elektronenmikroskopie	+ Nachfrage begrenzt, methodische Vorteile, z. B. in-vivo-Untersuchungen möglich
Modellierung biologischer Strukturen und Prozesse		Untersuchungsverfahren mithilfe von Labs-on-a-Chip	+ Realisierbarkeit von Nanocomputern noch nicht erwiesen, bedeutende Konkurrenz durch Labs-on-a-Chip
Diagnostik und Analyse an biologischen Systemen	Telemedizin, Pervasive Computing, Verfahren der Genomik und Proteomik, Mikroelektronik		+++ breite Nachfrage, methodische Vorteile, Synergien mit anderen Entwicklungen
Produktion biologischer Wirkstoffe		Biotechnologie, Chemie	(+) bedeutende Konkurrenz, vor allem durch Biotechnologie
Transport biologischer Wirkstoffe	Gentherapie	virale Transportsysteme, Alternativen zur medikamentösen Behandlung	+++ große Nachfrage, methodische Vorteile
Dosierung biologischer Wirkstoffe		biologische Dosiersysteme, z. B. verkapselte Zellimplantate	++ Nachfrage vorhanden, methodische Vorteile
Steuerung biologischer Prozesse		Bio- und Gentechnologie, Pharmakologie	(+) bedeutende Konkurrenz
Zerstörung biologischen Gewebes		chirurgische Verfahren, medikamentöse Behandlung, Radiotherapie, Gentherapie, Agrochemikalien	+ bedeutende Konkurrenz
Implantate und medizinische Instrumente	Bio- und Gentechnologie, Medizintechnik	biologische Transplantate	++ wachsende Nachfrage, überzeugende methodische Vorteile
Ernährung	Functional Food	klassische Tier- und Pflanzenzüchtung, biologische Landwirtschaft, Bio- und Gentechnologie, Verfahren der Lebensmitteltechnologie	+ großer Markt, Nachfrage jedoch ungewiss, bedeutende Konkurrenz

noch Tabelle 14

<table>
<tr><th rowspan="2">Anwendungsbereich</th><th colspan="3">Umfeld und wirtschaftliches Potenzial</th></tr>
<tr><th>wichtige Synergien</th><th>wichtige Konkurrenten</th><th>Einschätzung des absoluten wirtschaftlichen Potenzials</th></tr>
<tr><td>Kosmetik</td><td>Cosmeceuticals</td><td>Pharmakologie, Chemie</td><td>+++
große Nachfrage, methodische Vorteile</td></tr>
<tr><td>Nanomaschinen</td><td></td><td>Biotechnologie, Mikrotechnologie</td><td>?
Realisierbarkeit und Anwendungsmöglichkeiten noch ungewiss</td></tr>
<tr><td>Biomoleküle für informatische Zwecke</td><td></td><td>Weiterentwicklung siliziumbasierter Rechner, Quanten-Computing</td><td>(+)
evtl. Einsatz bei Nischenprodukten</td></tr>
<tr><td>Biomimetik</td><td></td><td>Bio- und Gentechnologie, molekulare und supramolekulare Chemie</td><td>++
Nachfrage vor allem im Bereich neuer Materialien</td></tr>
</table>

Tabelle 14

Fortsetzung: „Entwicklungsprognose für das Jahr 2020“

<table>
<tr><th rowspan="2">Anwendungsbereich</th><th colspan="5">Entwicklungsprognose für das Jahr 2020</th></tr>
<tr><th>Projekte der Grundlagenforschung</th><th>anwendungsreife Forschungsergebnisse</th><th>einzelne Produkte auf dem Markt</th><th>erheblicher Marktanteil</th><th>dominierender Marktanteil</th></tr>
<tr><td rowspan="2">mikroskopische Untersuchung biologischer Objekte</td><td colspan="4"></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">Kommentar: vor allem weiterentwickelte Formen der Rastersondenmikroskopie</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Modellierung biologischer Strukturen und Prozesse</td><td colspan="3"></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">Kommentar: nanoinformatische Hilfsmittel für spezielle Anwendungen etabliert</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Diagnostik und Analyse an biologischen Systemen</td><td colspan="4"></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">Kommentar: weite Verbreitung von Lab-on-a-Chip-Technologie, Nutzung implantierbarer Nanosensoren für bestimmte medizinische Anwendungsbereiche</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Produktion biologischer Wirkstoffe</td><td colspan="3"></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">Kommentar: eher Nischenprodukte aufgrund starker Konkurrenz durch Biotechnologie</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Transport biologischer Wirkstoffe</td><td colspan="4"></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">Kommentar: Perspektive auf wirksamere und nebenwirkungsärmere Behandlung bietet erhebliche Marktvorteile</td></tr>
</table>

noch Tabelle 14

Anwendungsbereich	**Entwicklungsprognose für das Jahr 2020**				
	Projekte der Grundlagen-forschung	**anwendungs-reife Forschungs-ergebnisse**	**einzelne Produkte auf dem Markt**	**erheblicher Marktanteil**	**dominieren-der Markt-anteil**
Dosierung biologischer Wirkstoffe					
	Kommentar: sowohl Nanopartikel als auch teilweise nanoelektronische Dosier-systeme				
Steuerung biologischer Prozesse					
	Kommentar: eher Nischenprojekte aufgrund starker Konkurrenz durch Bio-technologie				
Zerstörung biologischen Gewebes					
	Kommentar: eher Nischenprodukte für spezielle Anwendungen				
Implantate und medizinische Instrumente					
	Kommentar: Nutzung nanotechnologischer Beschichtungen mit unterschiedlichen, auch kombinierbaren bioaktiven Oberflächeneigenschaften				
Ernährung					
	Kommentar: vielfältige Anwendungen, z. B. Functional Food				
Kosmetik					
	Kommentar: vielfältige Anwendungen, z. B. Cosmeceuticals				
Nanomaschinen					
	Kommentar: zukünftige Entwicklung noch sehr ungewiss				
Biomoleküle für informati-sche Zwecke					
	Kommentar: Einsatz für besondere Anwendungsgebiete				
Biomimetik					
	Kommentar: Einsatz für besondere Anwendungsgebiete				

Quelle: Basler & Hofmann 2002, S. 47–49

3. Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im internationalen Vergleich

In diesem Kapitel wird anhand bibliometrischer Daten und Patentindikatoren eine international vergleichende Analyse der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Teilbereich Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften vorgenommen (vgl. FhG-ISI 2003). Außerdem wird kurz auf Fördermaßnahmen in diesem Teilbereich eingegangen.

3.1 Bibliometrische Daten

Die intensivste Publikationstätigkeit im Teilbereich Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften zeigen die USA, Deutschland und Japan (Abbildung 22), auf den Plätzen vier und fünf folgen Großbritannien und Frankreich (Abbildung 23).

Betrachtet man die Anteile, die Publikationen im Teilbereich Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften an den Publikationen zur Nanotechnologie insgesamt ausmachen, so zeigt sich, dass hier insbesondere Australien, Kanada, USA und Großbritannien sehr präsent sind (Abbildung 24). Deutschland liegt mit knapp über 20 % ebenso wie Frankreich etwas unter dem Durchschnitt (21 %).

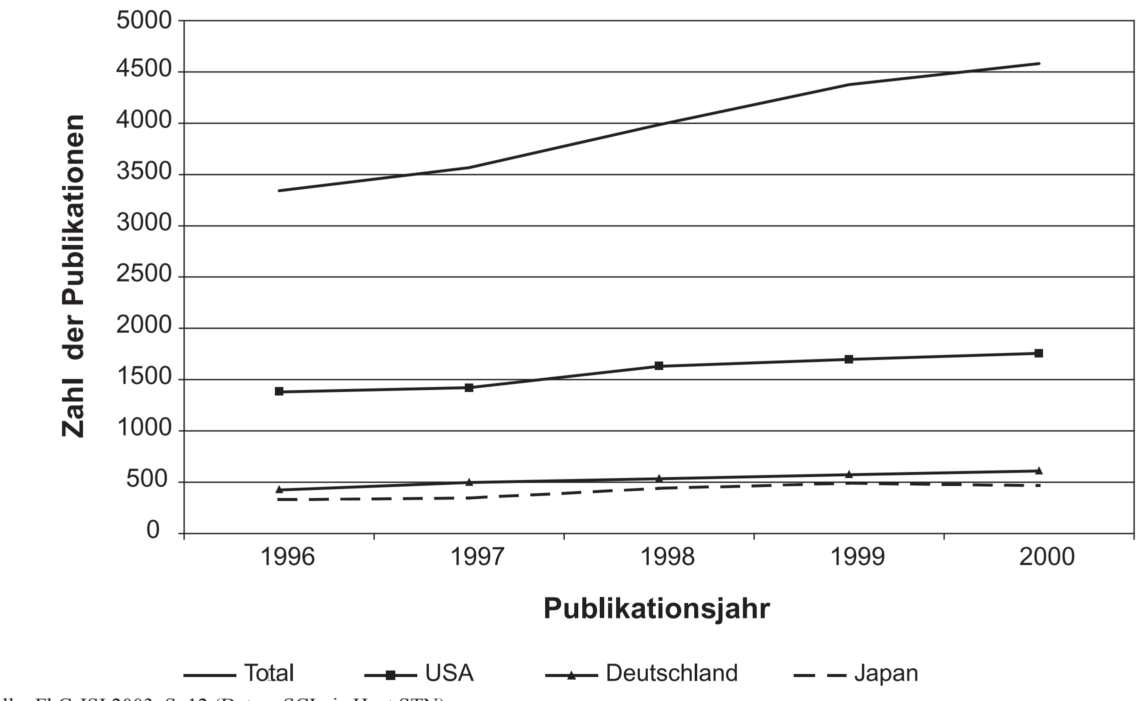
Schwerpunktsetzungen

Für Deutschland, Großbritannien, Frankreich und USA wird im Folgenden die inhaltliche Ausrichtung der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften anhand von Spezialisierungsprofilen betrachtet (Abbildung 25–29).

Für alle Länder zusammen betrachtet (Abbildung 25, S. 134) kommt dem Teilbereich Medizin die größte Bedeutung zu. Weltweit entfallen etwa 20 % der Publikationen zur Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften auf die Medizin. Es folgen Biologie (knapp 19 %) und Biotechnologie (16 %), dicht dahinter findet sich die Grundstoffchemie mit etwa 13 %. Mit 8 % ebenfalls noch relativ bedeutsam innerhalb der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften sind die Materialwissenschaften.

Abbildung 22

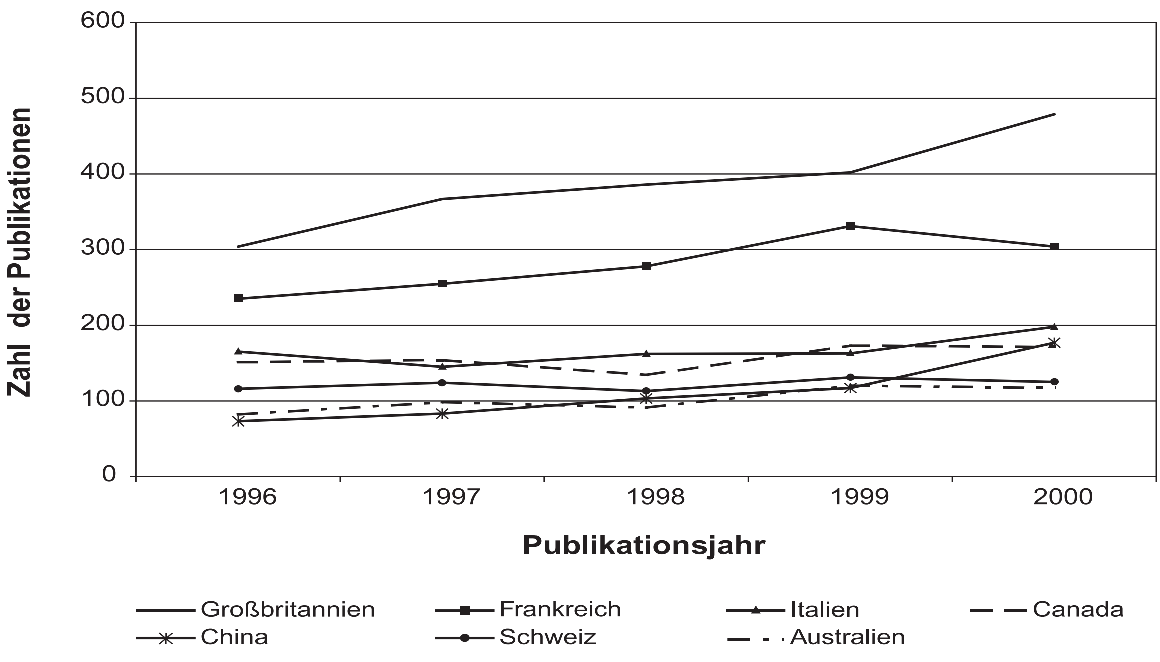
Die Top-3-Akteure im Bereich Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften – Publikationen



Quelle: FhG-ISI 2003, S. 12 (Daten: SCI via Host STN)

Abbildung 23

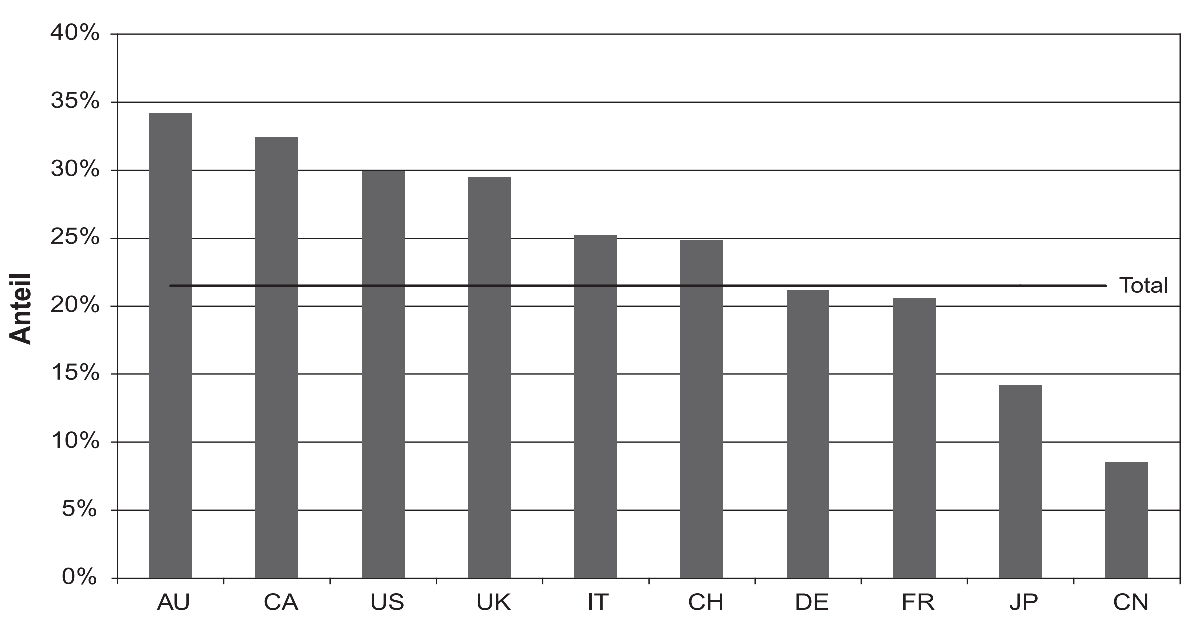
Die Top-4-10-Akteure im Bereich Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften – Publikationen



Quelle: FhG-ISI 2003, S. 13 (Daten: SCI via Host STN)

Abbildung 24

Anteil Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften an der Nanotechnologie insgesamt (1996 bis 2001) – Publikationen



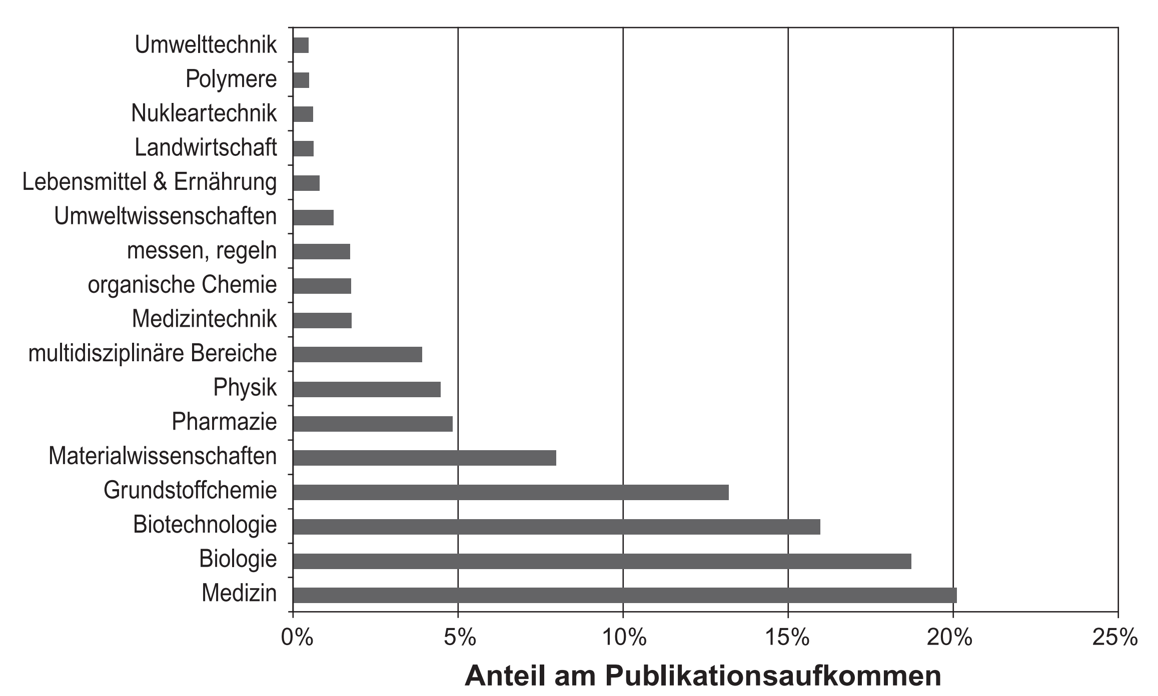
Anmerkung: AU=Australien; CA=Canada; US=United States of America; UK=Großbritannien; IT=Italien; CH=Schweiz; DE=Detuschland; FR=Frankreich; JP=Japan; CN=China

Quelle: FhG-ISI 2003, S. 13 (Daten: SCI via Host STN)

Abbildung 25



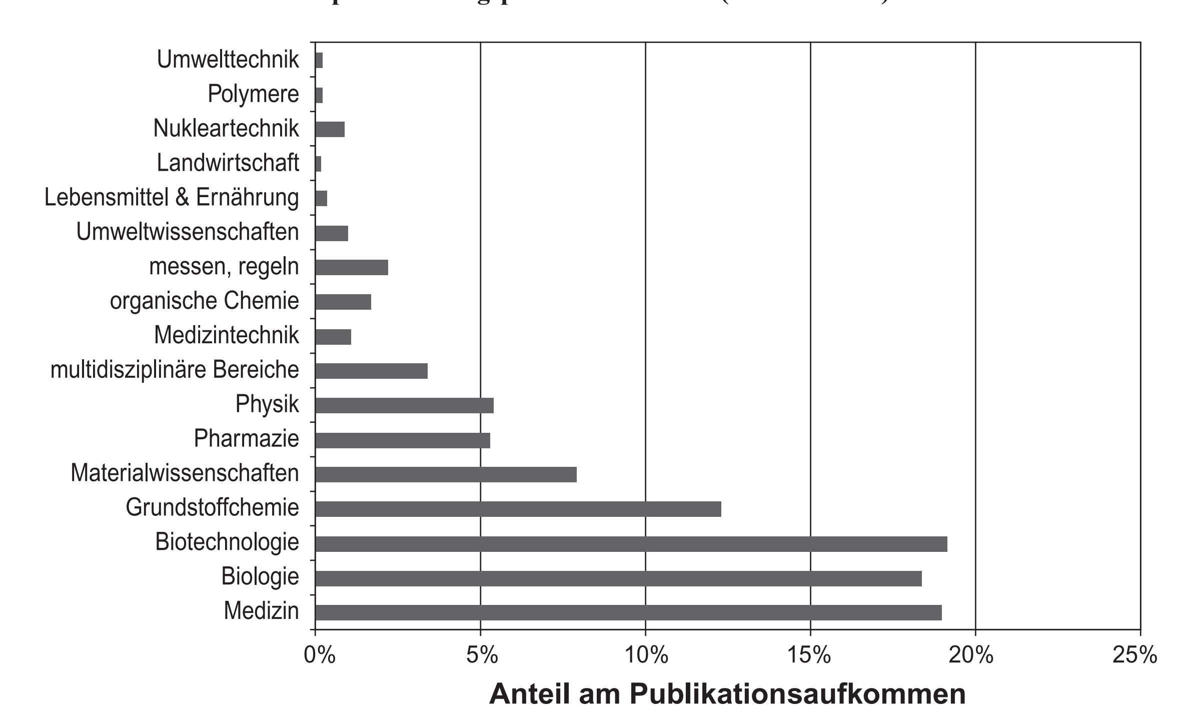
Spezialisierungsprofil gesamt (1996 bis 2001)



Quelle: FhG-ISI 2003, S. 16

Abbildung 26

Spezialisierungsprofil Deutschland (1996 bis 2001)

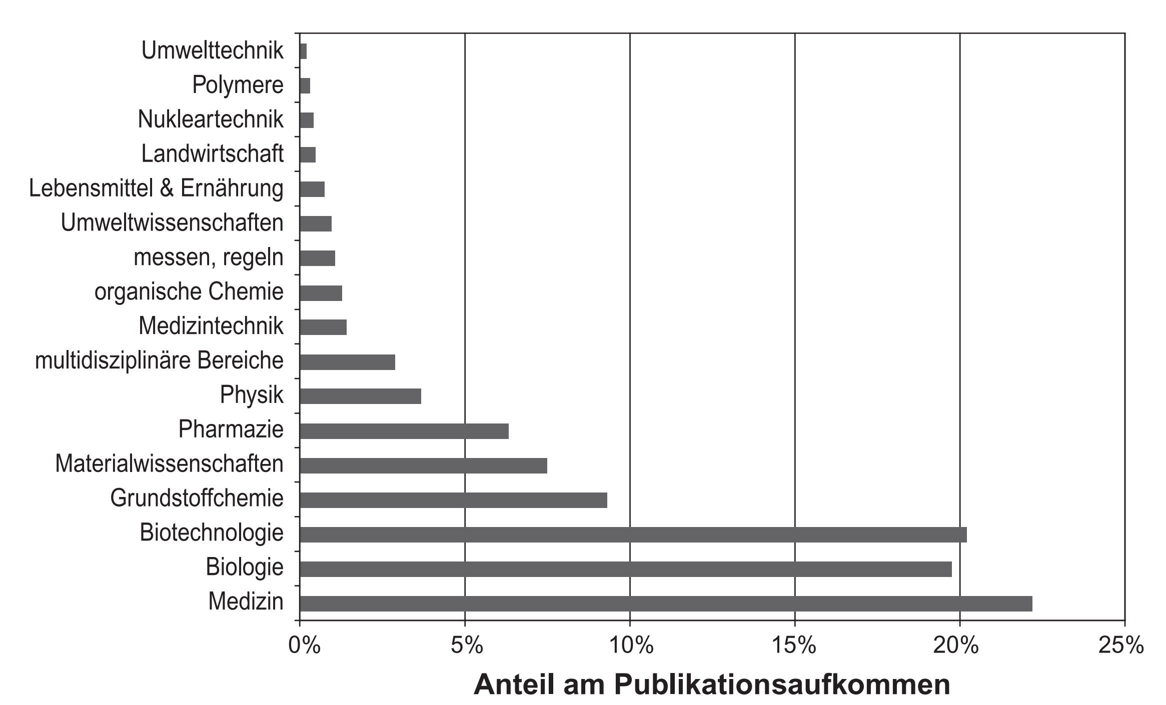


Quelle: FhG-ISI 2003, S. 17

Abbildung 27



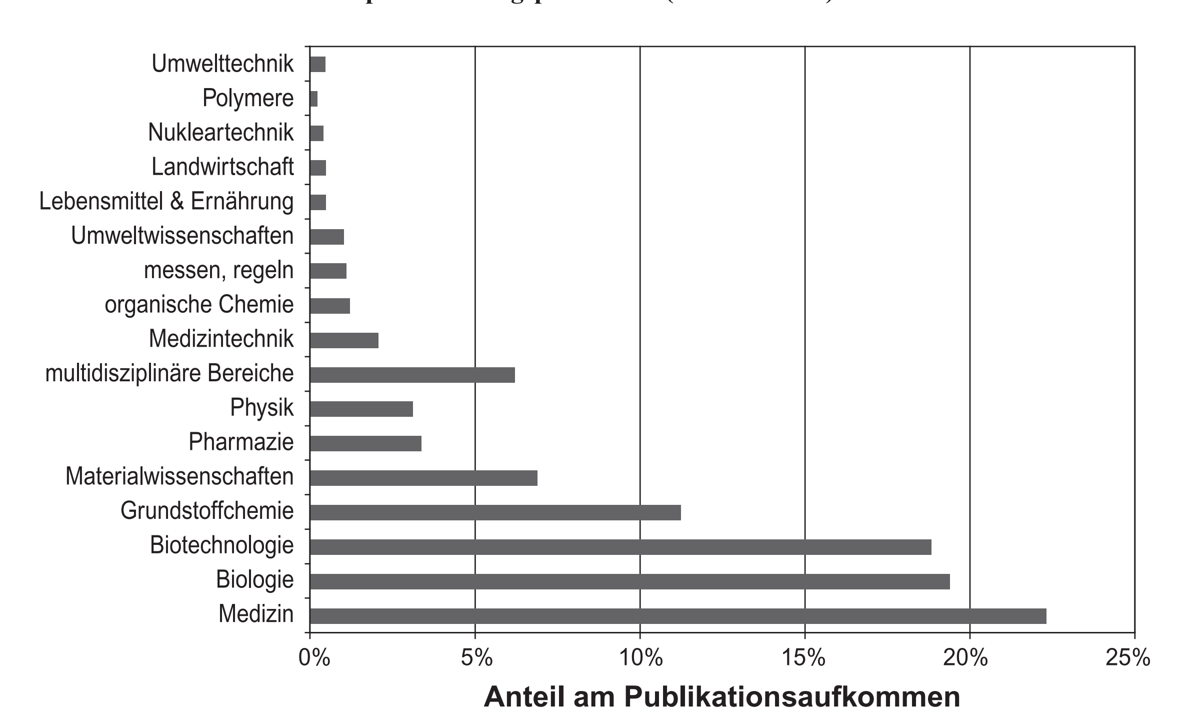
Spezialisierungsprofil Großbritannien (1996 bis 2001)



Quelle: FhG-ISI 2003, S. 18

Abbildung 28

Spezialisierungsprofil USA (1996 bis 2001)

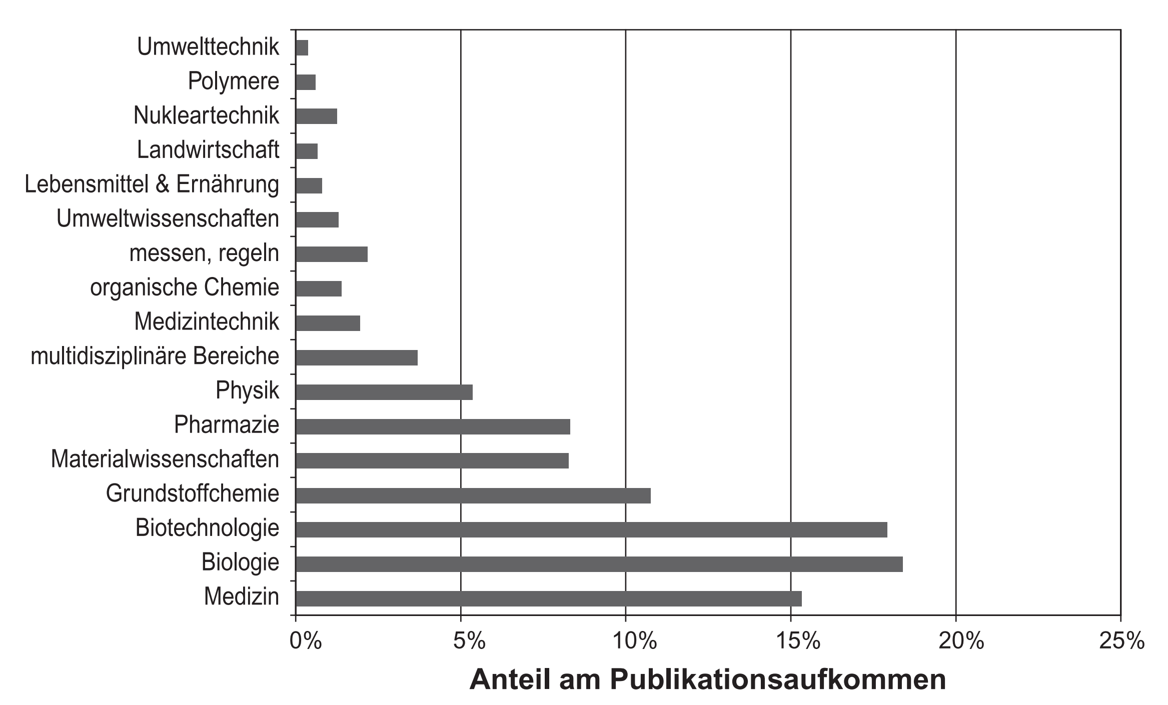


Quelle: FhG-ISI 2003, S. 17

Abbildung 29



Spezialisierungsprofil Frankreich (1996 bis 2001)



Quelle: FhG-ISI 2003, S. 18

Es zeigt sich, dass die Ausrichtung auf diesem recht hohen Aggregationsniveau in allen untersuchten Ländern ähnlich aussieht, Unterschiede liegen im Detail. So wird in Deutschland ein etwas stärkeres Augenmerk auf die Biotechnologie gelegt. Auf sie entfallen 19 % der Publikationen, nur knapp dahinter liegt jedoch auch in Deutschland die Anwendung im Bereich der medizinischen Forschung. Geringfügig geringer als im internationalen Durchschnitt sind in Deutschland die Publikationsanteile in den für die materialwissenschaftliche Forschung relevanten Teilbereichen: Etwa 12 % der Publikationen entfallen auf die Grundstoffchemie, während 8 % den Materialwissenschaften direkt zugeordnet werden können. Im Vergleich insbesondere zu den USA und Großbritannien ist der Anteil der Forschungsaktivitäten im Bereich Messen und Regeln (2 %) in Deutschland etwas höher.

In Großbritannien wie auch in den USA liegt der Anteil der Medizin mit ca. 22 % über dem internationalen Durchschnittswert. Geringer fällt in Großbritannien der Anteil der Publikationen im Bereich der materialwissenschaftlichen Forschung aus. Ähnliches gilt für die USA, auch hier liegen Grundstoffchemie und Materialwissenschaften geringfügig unter dem jeweiligen internationalen Durchschnittswert. In den USA wird im Vergleich zu den anderen Ländern etwas stärkeres Gewicht auf die Medizintechnik (2 %) gelegt.

Auffällig im französischen Spezialisierungsprofil ist der im Vergleich zu den anderen Ländern höhere Anteil an Publikationen im Bereich Pharmazie (ca. 8 %). Im Vergleich geringer sind die Anteile der Medizin (ca. 15 %).

Gering sind in allen Ländern die Anteile, die auf die Teilbereiche Umwelttechnik und Umweltwissenschaften entfallen. Hierzu ist jedoch auch zu bemerken, dass im Vergleich zu den anderen Teilfeldern, insbesondere den medizinrelevanten Feldern, diese Teilbereiche in der den Untersuchungen zugrunde liegenden Datenbank insgesamt deutlich kleiner sind.

3.2 Patentanmeldungen

Im Vergleich zur Publikationstätigkeit verdrängt Frankreich bei den Patentanmeldungen Japan aus der Reihe der drei aktivsten Länder. Unverändert bleiben die USA und Deutschland auf den Positionen eins und zwei. Vor Japan liegen auch Großbritannien und mittlerweile auch Kanada, das zwischen 1997 und 1999 besonders stark zunehmende Aktivitäten in diesem Teilbereich der Nanotechnologie aufweist. Kanada verzeichnet deutlich überdurchschnittliche jährliche Wachstumsraten sowohl in der Nanotechnologie insgesamt als auch im Teilbereich Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften.

Die Abbildung 30 verdeutlicht, dass in Kanada ein deutlicher Fokus der anwendungsorientierten Arbeiten in der Nanotechnologie im Teilbereich der Lebenswissenschaften liegt. Kanada weist mit etwa 55 % (Australien knapp 60 %) den zweithöchsten Anteil diesbezüglicher Patentanmeldungen auf. Dies bestätigt auch die Ergebnisse der bibliometrischen Analyse: auch in den eher grundlagenorientierten Arbeiten setzen Australien und Kanada Schwerpunkte in den Teilbereichen der Lebenswissenschaften. Auch in Italien, Großbritannien, Schweiz und den USA bildet die Nanotechnologie in den Lebenswissen-

schaften einen Schwerpunkt im Bereich der nanotechnologischen Entwicklung. Deutschland bleibt mit 33 % unter dem internationalen Durchschnittswert (knapp 40 %).

Schwerpunktsetzungen

Bei den Patentanmeldungen (Abbildungen 31 bis 35) kommt dem Teilbereich der Pharmazie die größte Bedeutung innerhalb des Bereiches Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften zu. Im internationalen Durchschnitt entfallen knapp 24 % der Patentanmeldungen am Europäischen Patentamt auf die Pharmazie.

Deutschland liegt mit gut 25 % leicht über diesem internationalen Durchschnittswert. Besonders deutlich ist die sehr starke und deutlich überdurchschnittliche Fokussierung der französischen Patentaktivitäten auf die Pharmazie. Knapp 43 % der französischen Patentanmeldungen zur Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften entfallen auf die Pharmazie[27]. Die USA hingegen liegen mit knapp 21 % leicht unter dem internationalen Durchschnittswert, während Großbritannien mit 23 % etwa im internationalen Durchschnitt liegt.

International betrachtet entfallen 20 % der Patentanmeldungen auf die Biotechnologie. In Deutschland beträgt dieser Anteil ca. 16 % und bleibt somit unter dem internationalen Durchschnittswert. Mit 13,5 % noch deutlicher unterdurchschnittlich sind hier die Aktivitäten Frankreichs. Mit etwa 24 % überdurchschnittlich ist hingegen Großbritannien aktiv und auch die USA liegen mit gut 22 % der Patentanmeldungen über dem Durchschnittswert.

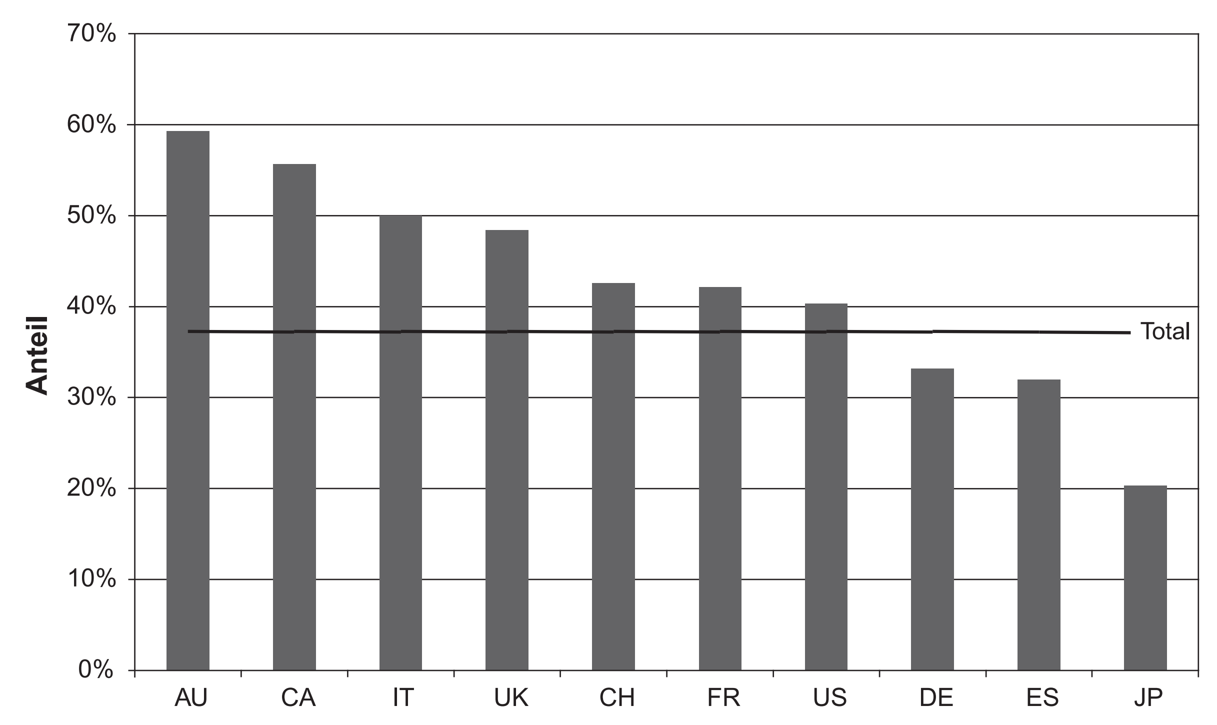
International gesehen auf dem dritten Platz liegt der Teilbereich Messen und Regeln. In Deutschland kommt diesem Teilbereich mit etwa 17 % der zweite Rang nach der Pharmazie und vor der Biotechnologie zu. Dieser Wert entspricht dem internationalen Durchschnitt. Stärkeres Augenmerk legen Großbritannien (21 %) und die USA (knapp 19 %) auf diesen Bereich. Auffällig ist die stärkere Fokussierung der deutschen Aktivitäten im Bereich der Verfahrenstechnik (ca. 7 %). Auch Frankreich zeigt hier überdurchschnittliche Aktivitäten (ca. 10 %). International liegt dieser Wert bei 5 %. In den USA (ca. 4 %) und Großbritannien (2 %) kommt diesem Bereich geringere Bedeutung zu.

In Deutschland ist im internationalen Vergleich weiterhin eine stärkere Fokussierung auf die für die Materialwissenschaften relevanten Teilbereiche zu beobachten, so etwa bei Polymeren (ca. 4 %), Grundstoffchemie (ca. 3 %), Oberflächentechnik (ca. 2 %) und Werkstoffen (etwa 1 %). Hier liegen die Anteile über den internationalen Vergleichswerten. Als einziges Land liegt Deutschland im Teilbereich der Umwelttechnik mit ca. 4 % über dem internationalen Durchschnitt (ca. 3 %).

[27] In der verwendeten Klassifikation der Technik wird auch die A61K007 – Kosmetika – unter dem Bereich Pharma subsumiert.

Abbildung 30





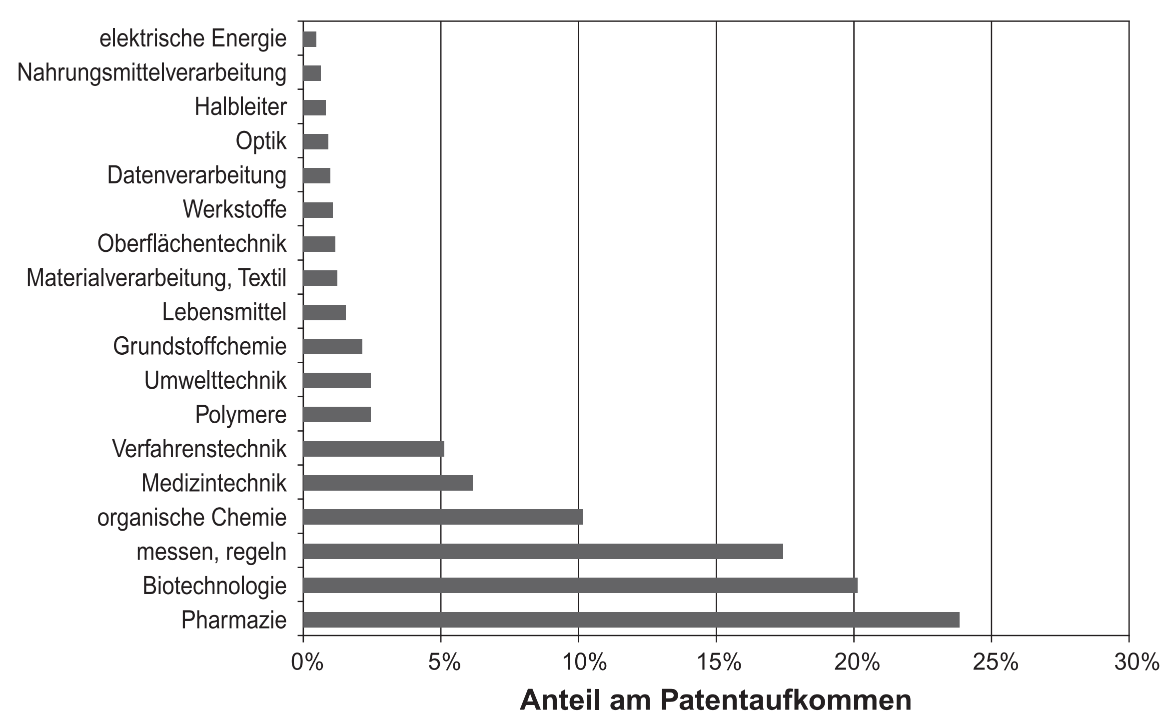
Anmerkung: AU=Australien; CA=Canada; IT=Italien; UK=Großbritannien; CH=Schweiz; FR=Frankreich; US=United States of America; DE=Deutschland; ES=Spanien; JP=Japan

Quelle: FhG-ISI 2003, S. 22 (Daten: WPINDEX und PATDPA via Host STN)

Abbildung 31



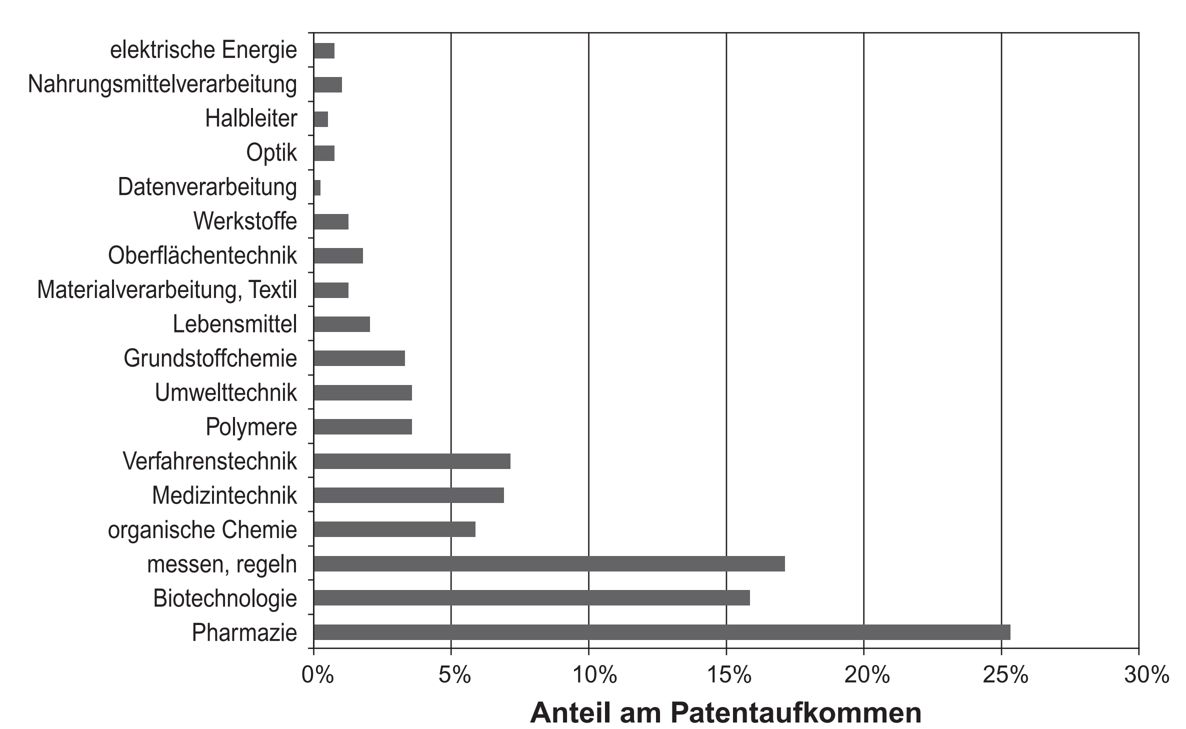
Spezialisierungsprofil Top-10-Gesamt (1996 bis 2000)



Quelle: FhG-ISI 2003, S. 27

Abbildung 32

Spezialisierungsprofil Deutschland (1996 bis 2000)

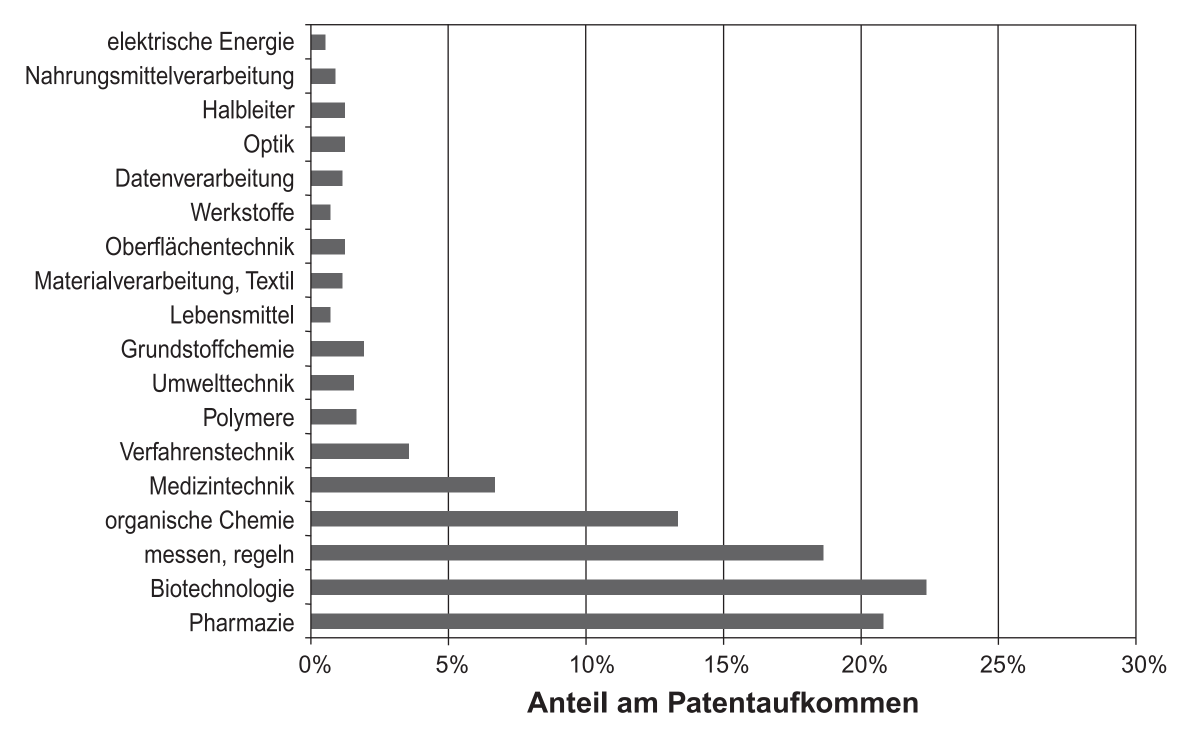


Quelle: FhG-ISI 2003, S. 28

Abbildung 33



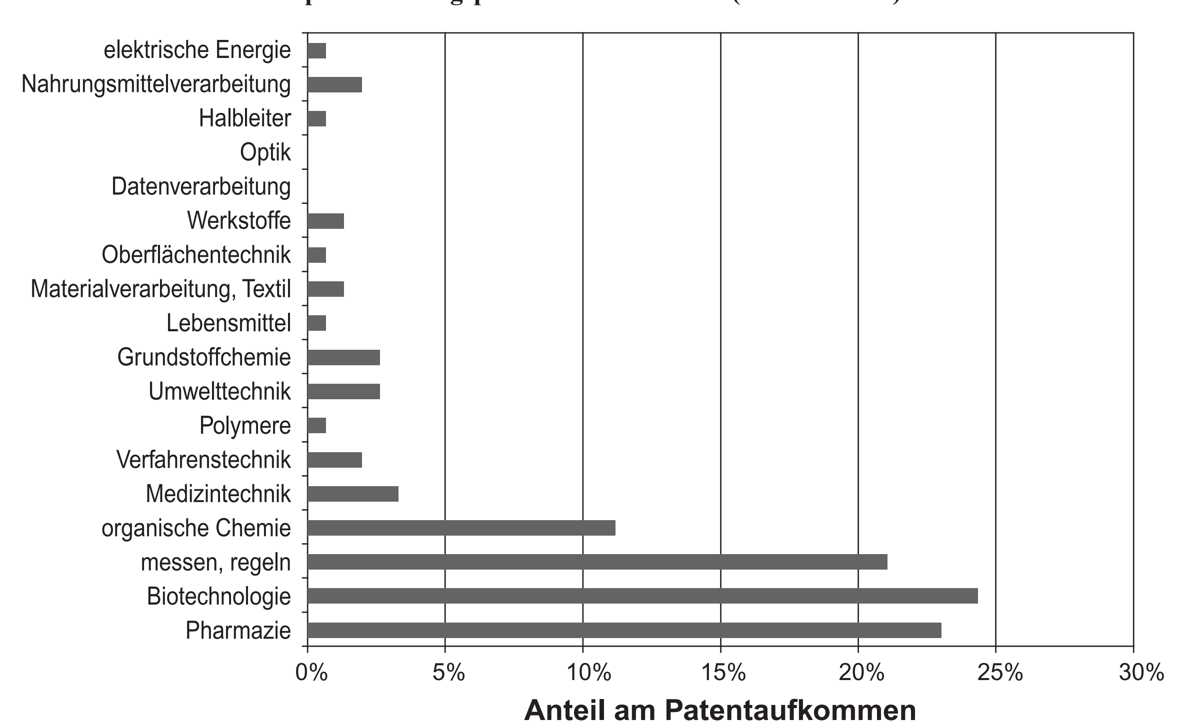
Spezialisierungsprofil USA (1996 bis 2000)



Quelle: FhG-ISI 2003, S. 28

Abbildung 34

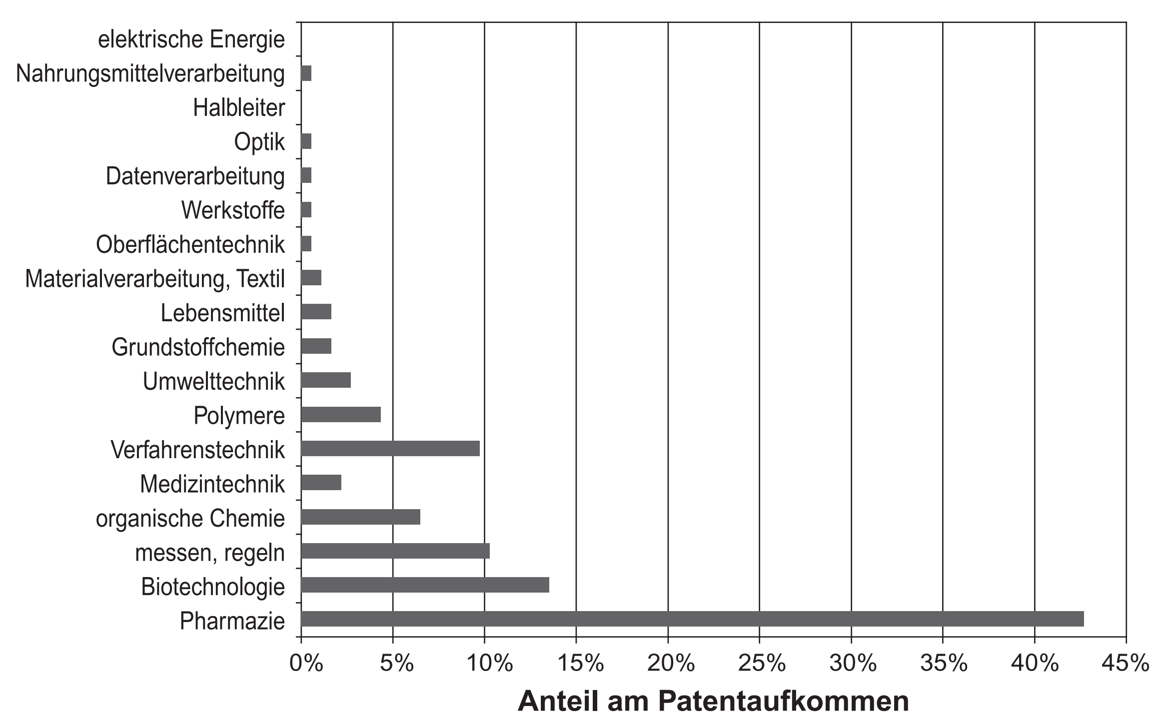
Spezialisierungsprofil Großbritannien (1996 bis 2000)



Quelle: FhG-ISI 2003, S. 29

Abbildung 35





Quelle: FhG-ISI 2003, S. 29

3.3 Fördermaßnahmen

Anwendungen der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften wird ein hohes wirtschaftliches Potenzial eingeräumt (vgl. z. B. Luther 2002). International hat sich bereits ein reger Wettbewerb um Forschungsergebnisse und Patente entwickelt.

Deutschland

Um bei diesem Wettbewerb bei zurzeit guter Ausgangsposition weiterhin mithalten zu können, wurden in Deutschland verschiedene Fördermaßnahmen initiiert. Das derzeit wichtigste Programm im Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften stellt der „Förderschwerpunkt Nanobiotechnologie“ des BMBF dar. Gefördert werden insbesondere „innovative Verbundsysteme der anwendungsorientierten Forschung, die ein arbeitsteiliges und multidisziplinäres Zusammenwirken von Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen erfordern, um wissenschaftliche Ergebnisse in Anwendungen umzusetzen“. Themenschwerpunkte sind (vgl. Basler & Hofmann 2002, S. 10 f.):

– Manipulationstechniken für biologische bzw. funktionsanaloge biochemische nanoskalige Objekte: Schneiden, Fügen und Positionieren auf der Nanometerskala zur Herstellung und Handhabung maßgeschneiderter biologischer Moleküle etwa zum therapeutischen bzw. diagnostischen Einsatz;

– Analyse- und Charakterisierungsverfahren mit Auflösungsvermögen im Nanometerbereich für biologische, medizinisch-diagnostische Fragestellungen sowie die Nutzung biologischer Eigenschaften für nanoanalytische Fragestellungen;

– nanotechnologische Nutzung biologischer Adaptions-, Reparatur- und Selbstorganisationsfähigkeiten, z. B. für Strukturierungstechniken und Konstruktion vernetzter molekularer Systeme;

– Reaktionstechniken zur Charakterisierung von Struktur-Wirkungsbeziehungen biologischer und funktionsanaloger biochemischer Systeme und deren Nutzung;

– Design und Einsatz von molekularen und zellulären Werkzeugen, Maschinen (biologische Schalter, Aktuatoren, Motoren) und Transportsystemen;

– Entwicklung von Signal- und Energiewandlern sowie von Bauteilen zur Informationsverarbeitung bzw. Datenspeicherung auf der Ebene einzelner biologischer oder bioanaloger Moleküle;

– Interfacetechnologie: Nanoskalige Verknüpfung von technischen und biologischen Systemen (z. B. halbleitende Bauelemente mit biomolekularen Funktionseinheiten) sowie Verknüpfung von mikro- mit nanoskaligen Funktionselementen.

Das Projekt unterhält eine eigene Website (http://www.nanobio.de). Der Förderschwerpunkt ist für seine

Laufzeit von 2000 bis 2006 mit ca. 50 Mio. Euro ausgestattet. In der ersten Antragsrunde 2001 wurden 21 Projekte mit einem Volumen von etwa 20 Mio. Euro bewilligt. Weitere sieben Projekte wurden in der zweiten Antragsrunde ausgewählt und werden mit ca. 7,5 Mio. Euro gefördert (BMBF 2001). Als Bestandteil der Fördermaßnahme Nanotechnologie wurden sechs Kompetenzzentren eingerichtet, die für Beratung und Hilfestellung zur Verfügung stehen. Zwei dieser Zentren, das „Zentrum NanoChem" und das „Zentrum Ultradünne Schichten", weisen Bezüge zur Nanobiotechnologie auf.

Auch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützt Forschungsvorhaben im Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften. Ein Schwerpunktprogramm im Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften existiert bisher jedoch nicht.

USA

In den USA wurden seit dem Jahr 2000 die Aktivitäten im Bereich der Nanotechnologie auch im Teilbereich der Lebenswissenschaften deutlich verstärkt und ausgedehnt, Ausdruck ist die seit 2000 bestehende National Nanotechnology Initiative (NNI) (Roco 2001b). Die Förderung der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften ist explizit Bestandteil der NNI.

Folgende im Rahmen der NNI festgelegten Grand Challenges, d. h. besonders langfristig ausgerichtete Forschungsaktivitäten, sind für den Teilbereich Lebenswissenschaften besonders relevant (National Science and Technology Council 2000, S. 47 ff.):

- Advanced Healthcare, Therapeutics and Diagnostics
- Nanoscale Processes for Environmental Improvement
- Bio-nanosensor Devices for Communicable Disease and Biological Threat Treatment
- National Security

Ebenfalls relevant sind die Bereiche „Nanostructured Materials by Design", „Nano-Electronics" und „Optoelectronics and Magnetics".

Im Rahmen der NNI wurden außerdem Centres of Excellence gegründet, sechs davon an Universitäten, wobei es sich um kooperative Einrichtungen über Universitätsgrenzen hinweg handelt (Kapitel III.3.3).

Der Fokus aller sechs Zentren liegt auch im Bereich der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften. Weiterhin wird durch die NSF das Nanobiotechnologiezentrum an der Cornell University (NBTC) gefördert, ebenfalls eine universitätenübergreifende Einrichtung. Die Förderung von bis zu 19 Mio. US-Dollar erstreckt sich über einen Zeitraum von fünf Jahren (Segelken 1999). Die Aktivitäten des NBTC erstrecken sich auf sechs Themenbereiche: molecular templates, bioselective surfaces, sparse cell isolation, molecular filtration, micronanalysis of biomolecules, molecular motors.

Des Weiteren richtet die NASA an sieben Universitäten „Research, Engineering and Technology Institutes" (URETI) ein. An vier der sieben Universitäten handelt es sich dabei um Institute, die für die Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften relevant sind (The Institute of Nanotechnology 2002b):

- University of California Los Angeles: bio-nano information technology fusion
- Princeton und Texas A&M University: bio-nano materials and structures for aerospace vehicles
- Purdue University: nanoelectronics and computing

Großbritannien

Das Interesse an Nanotechnologie insgesamt hat in Großbritannien zuletzt einen Aufschwung erfahren, die Nanotechnologie wird dementsprechend derzeit durch eine Reihe verschiedener Research Councils gefördert. 2001 wurde als bedeutendste Fördermaßnahme die Gründung von drei Interdisciplinary Research Collaborations (IRC) beschlossen (The British Council 2002, S. 5), von denen zwei für den Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften besonders bedeutsam ist.

Am IRC Bionanotechnologie sind die Universitäten Oxford, Glasgow, York, Cambridge, Nottingham und Southampton sowie das National Institute for Medical Research beteiligt. Die Arbeiten sind auf die Erforschung natürlich vorkommender biomolekularer Nanosysteme – vom Einzelmolekül bis hin zu molekularen Maschinen – gerichtet. Die drei Themen, mit denen sich das Zentrum beschäftigt, sind: „Molecular Motors", „Functional Membrane Proteins" sowie „Nano-Electronics and Photonics" (Cooper et al. 2001). Ziel des IRC Bionanotechnologie ist die Herstellung künstlicher elektronischer and optischer Geräte. Die Förderung beträgt etwa 9 Mio. £ über einen Zeitraum von sechs Jahren**.**

Ein weiteres IRC, zum Thema Tissue Engineering, wurde 2001 an den Universitäten Manchester und Liverpool eingerichtet. Das Zentrum wird über sechs Jahre mit insgesamt 9,7 Mio. £ gefördert. Themenschwerpunkte sind: Klinische Forschung im Bereich von „Skin/Wound Healing, Cartilage/Intervertebral Disc Repair and Vascular/Blood Vessel Replacement" sowie Forschung zu „Tissue Engineering Platform Technologies including Biomaterials, Biocompatibility, Haemodynamics, Angiogenesis and Gene Transfer" (UK Centre for Tissue Engineering 2001).

Biologische Aspekte der Nanotechnologie bilden seit 2000 einen der Forschungsschwerpunkte des Biotechnology and Biology Sciences Research Council (BBSRC) in Großbritannien. Innerhalb des BBSRC fällt das Thema in den Kompetenzbereich des Engineering and Biological Systems Committee (EBS). Derzeit werden durch EBS 20 Projekte mit insgesamt 4 Mio. £ gefördert (BBSRC 2002a). Derzeitige Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen: „Surface Chemistry, including Immobilization Techniques and Biomolecular Patterning Methods", „Nanofabrication and Molecular Assembly", „Interfacing Higher Order Biomolecular Systems" sowie „Theoretical Modelling and Simulation" (BBSRC 2002b).

Europäische Union

Auf europäischer Ebene ist im 6. Rahmenprogramm der EU (2002 bis 2006) eine starke Förderung der Nanotechnologie im Bereich Life Sciences vorgesehen. Der Programmschwerpunkt „Nanotechnologie und Nanowissenschaften, wissensbasierte multifunktionelle Werkstoffe, neue Produktionsverfahren und -anlagen“ wird in den Jahren 2002 bis 2006 mit insgesamt 1,3 Mrd. Euro finanziert. Ein Schwerpunkt innerhalb dieses Themenbereiches wird die Nanobiotechnologie sein (European Commission 2002).

4. Zusammenfassung

Sowohl die Nanotechnologie als auch die Lebenswissenschaften sind umfangreiche Entwicklungsgebiete, die sich zurzeit hinsichtlich ihrer Forschungsrelevanz als auch ihrer Anwendungsbezogenheit außerordentlich entfalten und zugleich in der Gesellschaft intensiv diskutiert werden.

Zu den Lebenswissenschaften im engeren Sinn zählen Biologie und Humanmedizin sowie Veterinärmedizin mit den entsprechenden anwendungsorientierten Disziplinen, z. B. Medizintechnik und Biotechnologie. Berührungspunkte ergeben sich zu den dortigen biotechnischen Entwicklungen; dazu zählen beispielsweise neue biomedizinische Therapien (Gentherapie, Zelltherapie, Xenotransplantation etc.), künstliche Implantate (Gewebe und Organe), die individualisierte Medizin (Pharmakogenomik etc.), aber auch die Telemedizin. Im weiteren Sinne können auch Pharmazie, Kosmetik, Ökotrophologie, Agrarwissenschaft, Forstwissenschaft und Umweltwissenschaften zu den Lebenswissenschaften gezählt werden. Das Hauptaugenmerk liegt in diesem Kapitel auf den Anwendungen der Nanotechnologie in den biomedizinischen Bereichen.

Nanotechnologie und Lebenswissenschaften ergänzen sich gegenseitig in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsbereiche. Aktuell zeichnet sich ein breites Spektrum von technischen Entwicklungen im Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften ab. Berührungspunkte zwischen Nanotechnologie und Lebenswissenschaften ergeben sich insbesondere dort, wo Nanotechnologie eingesetzt wird, um Ziele der Biowissenschaften zu erreichen und/oder die Nanotechnologie von Erkenntnissen und Verfahren aus den Biowissenschaften profitiert.

Unter der „Transferrichtung Nano2Bio“ ist die Nutzung nanotechnologischer Verfahren und Materialien für die Untersuchung biologischer Fragestellungen zu verstehen. Unter diesem Blickwinkel sind unter anderem Nanoanalytik, Nanomanipulationstechniken für biologische Strukturen und Objekte, nanotechnologisch hergestellte Wirkstoffe für lebende Organismen, Nanofähren für den Transport von Wirkstoffen, Nanomaschinen, Nanorobotik für Forschung, Diagnostik und Therapie, nanotechnologisch beschichtete Implantate sowie nanoelektronische, insbesondere neurologische Implantate als Anwendungsperspektiven zu nennen. Die „Transferrichtung Bio2Nano“ steht für bio(techno)logische Materialien und Baupläne zur Herstellung technischer Nanosysteme. Diese könnten in den Bereichen Information und Kommunikation, Energie und Umwelt u. a. m. für technische Anwendungen nutzbar gemacht werden. Zu nennen sind hier z. B. nanotechnologische Anwendungen nach biologischen Vorbildern, der Einsatz biologischer Bausteine im Nanomaßstab für technische Systeme oder die Nanoelektronik und Nanoinformatik unter Verwendung biologischer Bausteine, Funktions- oder Organisationsprinzipien.

Im Überblick lässt sich konstatieren, dass sich für die nächsten Jahre marktfähige Anwendungen vor allem bei Implantaten und Transplantaten und im Bereich der Drug-Delivery-Systeme für Medizin, Ernährung und auch Kosmetik abzeichnen. Bei der Analyse von Nanostrukturen nimmt die Rastersondenmikroskopie eine führende Position ein. Einige nanotechnologische Produkte überzeugen durch ein neuartiges Leistungsspektrum bzw. hohe Wirksamkeit. Die Einführung solcher Produkte, die bereits bestehende Entwicklungen fortführen, erfolgt jedoch weitgehend, ohne dass der Bezug zur Nanotechnologie in der Öffentlichkeit besonders wahrgenommen wird.

Im Hinblick auf die jeweiligen Anwendungsbereiche lässt sich im Einzelnen Folgendes resümieren:

Für den Bereich der (Bio-)Medizin wird durch die Nanotechnologie insgesamt ein beträchtliches Chancenpotenzial erwartet. Aus Sicht vieler Experten bedarf es gezielter Analysen des breiten Spektrums neuer Möglichkeiten (Technologiefrüherkennung), um dieses Chancenpotenzial hinreichend nutzbar zu machen. Thematisiert wird, welche Verbesserungen für den Patienten einerseits und für den behandelnden Arzt andererseits durch die Anwendung von Nanotechnologie kurz-/mittelfristig zu erwarten sind, Stichworte: minimalinvasive Therapie, bessere Verträglichkeit von Prothesen und Implantaten, schnellere Heilung, Tissue Engineering, bio-elektronisches Interface für Prothesen/Ankopplung an das Nervensystem.

Große Marktvolumina werden auch für die Bereiche Ernährung und Kosmetik erwartet. Bei der Ernährung stehen derzeit nanotechnologisch hergestellte Verpackungen sowie Farb- und Zusatzstoffe im Vordergrund. Künftig dürfte Nanotechnologie auch im Bereich des Functional Food eine Rolle spielen, wo sie die Verfügbarkeit bioaktiver Substanzen erhöht. In Kosmetika werden Nanopartikel bereits eingesetzt, z. B. für Sonnenschutzmittel mit verbesserten Eigenschaften. Die Partikel halten Wirkstoffe länger bioaktiv und können die biologischen Barrieren der Haut teilweise durchdringen. In der Landwirtschaft, bei Pflanzenproduktion und Veterinärmedizin sind nanotechnologische Ansätze bisher selten, da der Preis bei neuen Anwendungen in diesen Gebieten eine entscheidende Rolle spielt. Mittelfristig können diese Bereiche der Lebenswissenschaften jedoch voraussichtlich von Fortschritten bei der Humanmedizin profitieren, welche die preisgünstigere Entwicklung und Herstellung von Folgeprodukten für andere Anwendungsbereiche erlauben.

Der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften wird von einigen Experten ein hohes wirtschaftliches Potenzial bescheinigt. Anwendungen der Nanotechnologie auf biologische Systeme sowie biologische Vorbilder und Komponenten für die Nanotechnologie können neuartige und bessere Leistungen hervorzubringen. Aufgrund ihrer hohen Effizienz und Effektivität, der Nutzung von Selbstorganisationsprozessen und natürlichen Komponenten bzw. Vorbildern kann auch mit z. T. günstigen ökologischen Eigenschaften gerechnet werden. Mit anderen aktuellen Entwicklungen, etwa der individualisierten Medizin, ergeben sich Synergien. Nano-, Bio- und Gentechnologie ergänzen sich teilweise, bringen aber auch konkurrierende Entwicklungen hervor.

Im vorliegenden Kapitel werden primär die Anwendungsbereiche berücksichtigt; sekundär einbezogen sind auch die angewendeten Verfahren. Viele Vorhaben befinden sich zurzeit noch im Stadium der Grundlagenforschung, der Anwendungsbezug ist daher zum Teil prospektiv zu verstehen. Im Folgenden werden die wichtigsten Beispiele aus den Anwendungen der Nanotechnologie insbesondere in den biomedizinischen Bereichen in kurzer Form zusammengefasst.

Diagnostik

So genannte Diagnosechips für Krankheiten und genetische Dispositionen werden von verschiedenen Start-up-Unternehmen entwickelt. Die Nanotechnologie kann bei der Optimierung dieser Biochips helfen. Mit solchen Diagnosechips lassen sich Tausende von Genen gleichzeitig untersuchen. Dazu werden im Labor hergestellte Genstücke mit bekannten Eigenschaften auf die Chipoberfläche geklebt. Eine Diagnose hängt z. B. davon ab, an welche Genstücke sich die DNA aus dem Blut eines Patienten anlagert. An DNA-Fragmente gekoppelte Nanopartikel z. B. erlauben die Identifikation definierter DNA-Sequenzen. Viren und Zelltypen können aufgrund von Oberflächeneigenschaften identifiziert werden, die sie an bestimmte Nanostrukturen haften lassen.

Eine Nachfrage nach solchen Diagnosechips ist beispielsweise für biomedizinische Analysen zu erwarten, die unkompliziert in jeder Arztpraxis oder auch vom Patienten zu Hause vorgenommen werden können. Diagnosechips, die es erlauben, Laboranalysen mit kleinsten biologischen Proben zu Hause vorzunehmen, würden voraussichtlich sowohl zu medizinischen Zwecken als auch zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit eingesetzt. Interesse an Verfahren, die mit sehr geringen Probenmengen auskommen, ist auch im Bereich der Kriminaltechnik vorhanden. Synergien bestehen mit der Telemedizin: Chronisch Kranke oder Risikopatienten etwa können mithilfe implantierter Sensoren im Nanomaßstab überwacht werden.

In der Forschung besteht Bedarf an Sensoren, die es erlauben, das Verhalten von Biomolekülen und Zellorganellen in vivo zu verfolgen. Kleinste Sensoren, die in biologische Organismen eingepflanzt werden, könnten in Medizin und Forschung Auskunft über äußere Belastungen und den physiologischen Zustand des Organismus geben. Kleine Sensoren, die frühe Anzeichen einer Erkrankung, z. B. Krebs oder Herzinfarkt, erkennen, verfügen ebenfalls über ein hohes Marktpotenzial.

Im Bereich der Arbeits- und Umweltmedizin besteht Bedarf nach kleinen Biosensoren, die es erlauben, Schadstoffbelastungen an verschiedensten Orten differenziert zu messen, bzw. herkömmliche Produkte an Empfindlichkeit und Vielfalt der detektierbaren Substanzen übertreffen. Nanobiosysteme erlauben es, solche Verbesserungen zu erzielen.

Wirkstoffe

Bisher werden viele Medikamente vor allem über den Blutkreislauf unspezifisch im gesamten Körper verteilt, obwohl sie nur in einem bestimmten Organ oder Gewebe wirksam werden sollen. Die verabreichten Wirkstoffmengen sind daher zumeist verhältnismäßig hoch, Nebenwirkungen werden hervorgerufen, Wirkstoffe können ihre Wirksamkeit verlieren oder werden durch körpereigene Abwehrmechanismen vernichtet. Somit besteht ein erheblicher Bedarf an Vehikeln, die biologische Wirkstoffe, vor allem Medikamente, effizient zu ihrem Ziel transportieren und vielfach auch einen Schutzmantel bilden.

Nanopartikel können aufgrund ihrer Größe biologische Barrieren, wie z. B. Zellmembranen, verhältnismäßig leicht durchdringen und stellen daher geeignete Transportsysteme für Wirkstoffmoleküle dar. Nanopartikel lassen sich nicht nur zum Transport und Schutz biologischer Wirkstoffe einsetzen, sondern sind auch geeignet, solche Wirkstoffe über Zeiträume bis zu mehreren Monaten dosiert freizusetzen. Insbesondere wird an Vehikeln gearbeitet, die in der Lage sind, auf körpereigene Signale zu reagieren. In der Medizin besteht großer Bedarf an Dosiersystemen, die bioaktive Wirkstoffe solchermaßen kontrolliert abgeben, für Patienten und Behandelnde gut zu handhaben sind und ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis aufweisen. Zurzeit werden solche biologische Dosiersysteme entwickelt. Schilddrüsenzellen oder Inselzellen der Bauchspeicheldrüse beispielsweise werden heute bereits in teildurchlässige Hüllen verkapselt implantiert. Im Körper der so behandelten Patienten produzieren sie die zuvor fehlenden Hormone. Die teildurchlässige Hülle ermöglicht eine gewisse Regulierung der Hormonproduktion durch körpereigene Signale des Patienten und die Freisetzung der Wirkstoffe in den Körper des Implantatempfängers.

Eine wesentliche Ergänzung bzw. Verbesserung dieser Therapieansätze könnten so genannte nanobasierte Mikropumpen darstellen. Ende 2004 soll eine kleine und damit für die Patienten komfortable Pumpe auf den Markt gelangen, die Insulin verabreicht. Die Verbindung dieser Pumpe mit einem Biochip, der kontinuierlich den Blutzuckerspiegel überwacht, wird geprüft. Intensiv wird zudem auch an implantierbaren Chemotherapiesystemen im Nanomaßstab geforscht.

Verfahren, Materialien und Instrumente

An der Erforschung und Entwicklung von biomedizinischen Nanomaschinen wird international gearbeitet. Biologische Motoren, die als Vorbild für die Konstruktion technischer Motoren gelten, sind in der Regel aus

Proteinen zusammengesetzte supramolekulare Einheiten, die Bewegungsenergie aus einer chemischen Reaktion beziehen. Aktuell wird unter anderem an Motoren geforscht, die aus DNA-Molekülen sowie aus Aktin und Myosin bestehen. Bisher handelt es sich dabei überwiegend noch um reine Grundlagenforschung. Als in absehbarer Zeit realisierbare Nanomaschinen werden sehr kleine, bewegliche Endoskope eingestuft, die mit zusätzlichen Instrumenten, z. B. Greifarmen im Nanomaßstab, ausgestattet werden könnten. Für solche Geräte ist eine starke Nachfrage abzusehen.

Die Nano(bio)technologie könnte eventuell einen Beitrag zu besseren Behandlungserfolgen bei Krebserkrankungen leisten. Ein aktuelles Anwendungsfeld stellt z. B. die magnetfeldinduzierte Wärmebehandlung dar. In der Berliner Charité wird hierzu derzeit ein Projekt zur Zerstörung von Tumorzellen mithilfe magnetischer Nanopartikel durchgeführt. Dazu werden Nanoteilchen aus Eisenoxid in eine Form gebracht, in der sie selektiv von Tumorzellen aufgenommen werden. Beim Anlegen eines magnetischen Wechselfelds erzeugen die Teilchen Wärme und die Tumorzellen sterben ab. Bei einem weiteren Verfahren, an dem zurzeit geforscht wird, werden Nanostrukturen, die selektiv an Krebszellen binden, mit Radionukliden befrachtet. Tumorzellen sollen dadurch zerstört werden, ohne dass das umliegende Gewebe erheblichen Schaden erleidet.

Mithilfe der Nanotechnologie lassen sich Beschichtungen für medizinische Geräte herstellen, die antimikrobiell wirken, kaum verschmutzen oder leicht zu reinigen sind und Korrosion bei der Sterilisation oder Desinfektion verhindern. Solche Beschichtungen werden in der Praxis zum Teil bereits verwendet. Mittelfristig können Nanomaterialien als Transplantate, z. B. als künstliche Haut, zum Einsatz kommen oder den Aufbau solcher Transplantate aus Zellkulturen unterstützen. Auch Synergien zwischen Stammzelltherapie und Nanotechnologie sind denkbar, indem Nanotechnikmaterialien ein Gerüst bilden, das den Aufbau neuen Gewebes mithilfe von Stammzellen ermöglicht. Durch Verfahren der Nanotechnologie könnte die Biokompatibilität künstlicher Implantate verbessert werden. Zudem wird erwartet, dass Nanoimplantate länger im Körper funktionsfähig bleiben als bisher übliche. Damit könnten sich die Nebenwirkungen für Patienten verringern und Operationen zum Ersatz abgenutzter Implantate würden u. U. überflüssig.

Ein weiteres Entwicklungsgebiet stellen nanoelektronische Neuroimplantate dar, die Schäden an Sinnesorganen oder am Nervensystem kompensieren bzw. die Leistungsfähigkeit dieser Organe erhöhen und das menschliche Wahrnehmungsspektrum verbreitern. International wird bereits intensiv an Mikroimplantaten gearbeitet, die insbesondere die Funktionsfähigkeit von Sehsinn und Gehör wieder herstellen sollen.

Weitere Anwendungen der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften

Mithilfe der Nanobiotechnologie könnte die Qualität von Lebensmitteln verbessert, die Bioverfügbarkeit von wichtigen Inhaltsstoffen erhöht sowie optische Eigenschaften, Geschmack und Konsistenz verändert werden. Es sind nanotechnologisch optimierte Herstellungsverfahren und Verpackungsmaterialien im Gespräch, die den Zustand der verpackten Lebensmittel überwachen und beispielsweise eine Warnung zeigen, wenn die Kühlkette unterbrochen wurde oder ein Nahrungsmittel verdorben ist. Nachfrage ist auch bei geeigneten nanoanalytischen Verfahren zu erwarten. So werden beispielsweise nanoanalytische Methoden unter Verwendung von DNA-Chips für die Untersuchung von Lebensmitteln auf gentechnisch veränderte Bestandteile entwickelt.

Mithilfe der Nanotechnologie werden im Bereich der Kosmetik vor allem bestehende Produkte weiter entwickelt. Eine wichtige Funktion in der Kosmetik übernehmen Vehikel, die Wirkstoffe (z. B. Vitamine oder UV-Filter) zu ihrem Wirkungsort, etwa in tiefere Hautschichten, transportieren. Wirkstoffe sollen mithilfe von Nanopartikeln besser auf und in der Haut verteilt und effektiver abgegeben werden. Titan- oder Zinkoxidpartikel im Nanomaßstab werden beispielsweise in Sonnenschutzmitteln eingesetzt. Sonnenschutzprodukte mit Nanopartikeln zeigen nach heutigem Kenntnisstand höhere Wirksamkeit und bessere Hautverträglichkeit als konventionelle Produkte. Nachfrage besteht auch nach Präparaten, die der Hautalterung entgegenwirken (sollen). So genannte Nanoemulsionen sind haut- und umweltverträglicher als viele konventionelle Produkte. Generell stellt die Verpackung kosmetischer Wirkstoffe in Nanopartikel und Nanoemulsionen einen viel versprechenden Ansatz dar, um die Wirksamkeit von Kosmetika zu verbessern. Es ist daher zu erwarten, dass Nanopartikel künftig zunehmend in Kosmetika eingesetzt werden.

FuE-Aktivitäten

Eine international vergleichende Analyse der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Teilbereich Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften anhand bibliometrischer Angaben und Patentindikatoren ergibt, dass in Deutschland im Teilbereich Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften in weltweitem Maßstab die intensivste Publikations- und Patentanmeldungsaktivität nach den USA zu verzeichnen ist. Besonders relevant sind in Deutschland speziell die nanotechnologiebezogenen Publikationen in den Bereichen Biotechnologie, Biologie und Medizin, international leicht unterdurchschnittlich in den für die materialwissenschaftliche Forschung relevanten Teilbereichen. Bei den Patentanmeldungen kommt in Deutschland dem Teilbereich Pharmazie die größte Bedeutung innerhalb des Bereichs Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften zu, vor dem Teilbereich Messen und Regeln sowie Biotechnologie. Als einziges Land liegt Deutschland im Teilbereich der Umwelttechnik über dem internationalen Durchschnitt.

International hat sich ein reger Wettbewerb um Forschungsergebnisse und Patente entwickelt. Um bei diesem Wettbewerb bei zurzeit guter Ausgangsposition weiterhin mithalten zu können, wurden in Deutschland

verschiedene Fördermaßnahmen initiiert. Das derzeit wichtigste Programm im Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften stellt der „Förderschwerpunkt Nanobiotechnologie“ des BMBF dar. Gefördert werden insbesondere „innovative Verbundsysteme der anwendungsorientierten Forschung, die ein arbeitsteiliges und multidisziplinäres Zusammenwirken von Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen erfordern, um wissenschaftliche Ergebnisse in Anwendungen umzusetzen“. Zwei der als Bestandteil der Fördermaßnahme Nanotechnologie eingesetzten Kompetenzzentren weisen Bezüge zur Nanobiotechnologie auf. Auch die DFG unterstützt Forschungsvorhaben im Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften, ohne das bisher hierzu ein Schwerpunktprogramm eingerichtet worden ist. Auf europäischer Ebene wird im 6. Rahmenprogramm der EU der Programmschwerpunkt „Nanotechnologie und Nanowissenschaften, wissensbasierte multifunktionelle Werkstoffe, neue Produktionsverfahren und -anlagen“ in den Jahren 2002 bis 2006 mit insgesamt 1,3 Mrd. Euro finanziert. Ein Schwerpunkt innerhalb dieses Themenbereiches wird die Nanobiotechnologie sein.

VIII. Visionen zur Nanotechnologie

Der Begriff „Vision“ bezeichnet ursprünglich eine bestimmte Art mystisch-religiöser Erlebnisse und daran anschließend in der Medizin optische Halluzinationen. Seit geraumer Zeit versteht man unter einer Vision aber auch die Vorstellung eines angestrebten künftigen Zustands, der in absehbarer Zeit realisierbar erscheint. Dieser Gebrauch des Begriffs findet sich u. a. oft in politischen, ökonomischen und massenmedialen Diskursen. Zudem kennt der allgemeine Sprachgebrauch inzwischen die Ausdrücke „Schreckensvision“ und „Horrorvision“. Mit diesen werden (zumeist wohl in abwertend-skeptischer Weise) Visionen bezeichnet, die Unbehagen oder Angst auslösen.

Des Weiteren unterscheiden sich Visionen hinsichtlich ihre Realitätsgehaltes sowie des Zeitraums, auf den sie sich beziehen. Dementsprechend kann man Visionen grob in unrealistische (utopische) und realistische Visionen sowie in Langfrist-Visionen und Kurzfrist-Visionen unterteilen. Nach der hier gewählten Unterteilung umspannen Langfrist-Visionen Zeiträume von anderthalb bis vielen Jahrzehnten, Kurzfrist-Visionen beziehen sich höchstens auf die nächsten 15 Jahre. Die Frage nach dem Realitätsgehalt einer bestimmten Vision lässt sich hingegen naturgemäß erst im Nachhinein – also nach Ablauf der in ihr vorgestellten Zeitspanne – mit Sicherheit beantworten. Die Zahl in ihrer Zeit als realistisch geltender Visionen technischer Entwicklungen, die sich später als utopisch herausstellten, ist groß. Oft wurde Bekanntes in die Zukunft extrapoliert, das bald aufgrund neuer Erkenntnisse und Erfindungen überholt war. Weitere Probleme, die sich bei Technik-Visionen stellen, sind Wechselwirkungen zwischen Technikentwicklungen sowie gesellschaftliche Akzeptanzprobleme.

Es ist möglich, begründete Vermutungen darüber anzustellen, ob eine Technik-Vision utopisch oder realistisch ist. Realistische Visionen bauen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen ihrer Zeit auf, widersprechen nicht den bekannten Naturgesetzen und tragen dem wahrscheinlichen Wandel von Rahmenbedingungen der vorgestellten Entwicklung Rechnung. Visionen dieser Art können es der Gesellschaft, politischen Akteuren, der Wissenschaft oder Unternehmen erleichtern, sich auf mögliche zukünftige Entwicklungen einzustellen oder sogar gewünschte Prozesse gezielt zu befördern. In der Regel müssen sie dazu relevanten aktuellen Entwicklungen Rechnung tragen und eine nicht zu langfristige Perspektive haben. Kurzfrist-Visionen dieser Art können unmittelbar der Orientierung und Handlungsanleitung dienen.

Gerade in Debatten über neue Technologien stößt man aber oft auch auf Visionen, die nicht oder kaum auf aktuelle Gegebenheiten und Entwicklungen rekurrieren, das Problem des Wandels von Rahmenbedingungen ignorieren und sich zudem auf sehr lange Zeiträume beziehen. Indirekt können auch solche Langfrist-Visionen, selbst wenn sie sich später als utopisch erweisen, der Orientierung und Handlungsanleitung dienen: Zum einen können durch sie wichtige Fragen aufgeworfen und dadurch gesellschaftliche Debatten über eine Technologie gefördert (oder überhaupt erst angestoßen) werden. Zum anderen ist es möglich, dass Langfrist-Visionen – und insbesondere die utopischen – wissenschaftliche Forschungen voranbringen, indem sie Begeisterung für einen bestimmten Forschungsbereich wecken und zur Entwicklung neuer Ideen beitragen. Dies gilt auch für Technik-Visionen des Science-Fiction-Genres. Utopische Langfrist-Visionen technischer Entwicklungen stellen aber gleichzeitig ein Problem für forschungspolitisches Handeln dar, weil sie unberechtigte Hoffnungen oder Befürchtungen wecken und dadurch zu Fehlinvestitionen oder zu schädlicher Zurückhaltung bei der Förderung einer Technologie beitragen können.

Wenn in Visionen die Zukunft einer allgemein als vielversprechend eingeschätzten Technikentwicklung ausgemalt wird, erinnern sie oft an religiöse Prophezeiungen: Je nachdem, ob sie optimistisch oder pessimistisch sind, entwerfen sie dann Bilder zukünftigen Heils oder eines Weltuntergangs. (Oft wird behauptet, dass die Popularität von Technik-Schreckensvisionen sowie von Vorstellungen eines technisch ermöglichten Paradieses auf den geheimen religiösen Bedürfnissen jener Gesellschaftsschichten beruhe, die von ihrem Selbstverständnis her nicht religiös sind.)

1. Visionäre Diskurse zur Nanotechnologie

Nanotechnologie ist ein in hohem Maße visionäres Thema, sowohl was seine Behandlung in medialer Öffentlichkeit und Belletristik betrifft als auch in Diskursen an der Schnittstelle von Wissenschaft und Politik. In diesem Kapitel wird auf zwei visionäre Diskurse eingegangen:

– Zum einen ist dies ein stark futuristisch[28] ausgerichteter Diskurs von Nanotechnologiebegeisterten, von denen sich einige schon seit den 1980er-Jahren für die Thematik interessieren. Der Diskurs dieser (gelegentlich abwertend Nanoisten oder nanoites genannten) Gruppen wurde und wird in hohem Maß von Schriften und Aktivitäten K. Eric Drexlers geprägt. Eine breitere Öffentlichkeit außerhalb der USA nahm den Diskurs vor allem aufgrund eines pessimistischen futuristischen Artikels von Bill Joy zur Kenntnis (Joy 2000). Der nanotechnologische Futurismus ist auch für die Science Fiction von Bedeutung. Des Weiteren tragen die (eng miteinander sowie mit den Nanoisten verflochtenen) soziokulturellen Gruppierungen der Transhumanisten und Extropier zu diesem visionären Diskurs über Nanotechnologie bei.[29]

– Zum Zweiten handelt es sich um einen stärker durch Kurzfrist-Visionen geprägten Diskurs im Umfeld forschungspolitischer Aktivitäten zur Nanotechnologie und insbesondere der US-amerikanischen „National Nanotechnology Initiative (NNI)“. Dieser Diskurs entfaltete sich u. a. auf mehreren wissenschaftlichen Workshops, die in den letzten Jahren von Einrichtungen der US-Regierung (mit-)organisiert wurden. In den Berichten zu diesen Veranstaltungen stößt man zwar auch auf futuristische Langfrist-Visionen, die zum Teil utopisch anmuten, und vereinzelt auf Einflüsse des Futurismus Drexlers. Öfter jedoch werden realistisch wirkende, vorsichtigere Kurz- und Langfrist-Visionen entwickelt und stark futuristische Vorstellungen kritisiert.

Ein gemeinsamer zentraler Bezugspunkt beider Diskurse sind die Überlegungen, die Richard Feynman im Jahr 1959 in einem Vortrag mit dem Titel „There is Plenty of Room at the Bottom“ entwickelt hat.[30] In diesem Vortrag entwarf Feynman – ausgehend von Erkenntnissen über die Leistungskraft biologischer Systeme – eine Vision extremer Miniaturisierung und legte dar, warum er die direkte Manipulation von Atomen und Molekülen für zukünftig möglich hielt.

Einige zentrale Elemente stark futuristisch ausgerichteter Langfrist-Visionen zur Nanotechnologie gleichen denjenigen zu anderen jüngeren Technologieentwicklungen, wie z. B. (Basler & Hofmann 2002, S. 85 f.):

– Universelles Anwendungsspektrum der neuen technischen Möglichkeiten;

– Befreiung des Menschen von Sorgen und Leiden durch praktisch kostenfreie und umweltfreundliche Produktion aller gewünschten Güter;

– Vervollkommnung der menschlichen Existenz;

– Erweiterung der individuellen Existenz durch raumzeitliche Vernetzung[31];

– Verlängerung der menschlichen Lebenserwartung;

– Risiko einer Zwei-Klassen-Gesellschaft im Hinblick auf die Techniknutzung und -beherrschung;

– Risiko einer unkontrollierbaren Technik[32], Untergang der Menschheit;

– Verschiebung der Grenzen zwischen Mensch und Außenwelt[33].

In visionären Diskursen zur Nanotechnologie wird oft dem Zusammenwirken von mehreren neuen Technologien eine herausragende Bedeutung für die Zukunft beigemessen. Einige Vorstellungen zur Nanotechnologie ergänzen dabei lediglich Visionen, die in Diskursen zu anderen Technologien entwickelt wurden, ohne dabei deren Charakter wesentlich zu verändern.

Selbst außerhalb des stark futuristischen Nanotechnologiediskurses stimuliert die Aussicht auf eine Konvergenz mehrerer Technologien futuristische Vorstellungen, wie sich z. B. im Diskurs im Umfeld der US-amerikanischen „National Nanotechnology Initiative“ zeigt. Auf diese und andere forschungspolitische Aktivitäten (vor allem) in den USA wird im nachfolgenden Unterkapitel (Kapitel VIII.2) eingegangen. Ein weiteres Unterkapitel (Kapitel VIII.3) behandelt den von Drexler geprägten, stark futuristischen Diskurs zur Nanotechnologie – einschließlich visionärer Vorstellungen in der Science-Fiction. Visionen werden dabei durchgängig vor allem als politisch relevante, sozial wirksame Vorstellungen untersucht (und nur vereinzelt hinsichtlich ihres möglichen Realitätsgehaltes).

2. Forschungspolitik, Wissenschaft und Visionen in den USA

Die Bedeutung von Nanotechnologie als Thema der Forschungspolitik und öffentlicher Debatten wurde erheblich durch die von US-Präsident Bill Clinton im Januar 2000 gestartete „National Nanotechnology Initiative“ (NNI)[34]

---

[28] Als „futuristisch“ werden in diesem Text Visionen bezeichnet, die tief greifende Veränderungen der natürlichen und kulturellen Bedingungen menschlicher Existenz voraussagen.

[29] „The ‚nano‘ is a lot of laborious work, but also it is nothing less than the ultimate challenge; the dream of any dedicated engineer. No surprise then, it is well established in popular culture. Long before it reached Presidential committees […], it flourished in science fiction movies, in the fantasy literature, and in groups of radical ‚nanoites‘ […]“ (Glimell 2001, S. 159).

[30] Die Mitschrift der am 29. Dezember 1959 auf dem Jahrestreffen der American Physical Society im California Institute of Technology (Caltech) gehaltenen Rede wurde zuerst in der Zeitschrift des Instituts (Engineering and Science, Februar 1960) veröffentlicht. Eine Online-Version findet sich unter http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html.

[31] Zum Beispiel Fortpflanzungstechnologie: Fortführung der eigenen Existenz durch Klonierung; Informationstechnologie: Aufbau virtueller Existenzen, Einsatz von Avataren und Software-Agenten.

[32] Zum Beispiel Gentechnologie: Risiko durch Selbstvermehrung genetisch manipulierter Organismen; Robotik und IT: Risiko, dass sich die Technik ihren Entwicklern gegenüber als überlegen erweist.

[33] Zum Beispiel Informationstechnologie: Mensch/Maschine-Schnittstellen, virtuelle Welten.

[34] Die Web-Präsenz der NNI findet sich unter http://www.nano.gov oder http://www.nsf.gov/home/ crssprgm/nano/start.htm. Für kurze Beschreibungen der Initiative siehe Kapitel III.3.3 sowie Roco (2002a).

gesteigert. In einer Presseerklärung seiner Regierung zur NNI finden sich folgende Formulierungen zu den in die Nanotechnologie gesetzten Hoffnungen: „The emerging fields of nanoscience and nanoengineering – the ability to manipulate and move matter – are leading to unprecedented understanding of the fundamental building blocks of all physical things. These developments are likely to change the way almost everything – from vaccines to computers to automobile tires to objects not yet imagined – is designed and made“ (White House 2000). Im selben Dokument heißt es, dass Nanotechnologie die „new frontier“ darstelle und verlockende Potenziale besitze. Unter anderem folgende Durchbrüche seien in der Zukunft denkbar (White House 2000):

– „Shrinking the entire contents of the Library of Congress in a device the size of a sugar cube through the expansion of mass storage electronics to multi-terabit memory capacity that will increase the memory storage per unit surface a thousand fold;

– Making materials and products from the bottom-up, that is, by building them up from atoms and molecules. Bottom-up manufacturing should require less material and pollute less;

– Developing materials that are 10 times stronger than steel, but a fraction of the weight for making all kinds of land, sea, air and space vehicles lighter and more fuel efficient;

– Improving the computer speed and efficiency of minuscule transistors and memory chips by factors of millions making today’s Pentium IIIs seem slow;

– Using gene and drug delivery to detect cancerous cells by nanoengineered MRI (Magnetic Resonance Imaging) contrast agents or target organs in the human body;

– Removing the finest contaminants from water and air to promote a cleaner environment and potable water;

– Doubling the energy efficiency of solar cells.“

In einer Rede im Januar 2000[35], in der Präsident Clinton die NNI ankündigte, vertrat er die Ansicht, dass einige dieser Forschungsziele erst in 20 oder mehr Jahren zu erreichen seien (Kalil 2001, S. 20). Für diese – in der NNI „Great Challenges“ genannten – langfristigen Forschungsziele werden in der NNI erhebliche Fördermittel aufgewendet. Ein Mitarbeiter Clintons nannte in einer Rede als weitere „große Herausforderung“ die Fähigkeit, dauerhaft eine unbemannte Präsenz außerhalb des Sonnensystems zu haben (Kalil 2001, S. 21).

Leitidee der NNI war die Annahme, dass wir derzeit die Anfangsphase der „nächsten industriellen Revolution“ erleben. Angenommen wurde, dass die Konvergenz mehrerer neuer Technologien eine umfassende und tief greifende Veränderung der sozioökonomischen und wissenschaftlich-technischen Basis moderner Gesellschaften mit sich bringen werde. Auch die Administration von Präsident George W. Bush sieht große Chancen in der Nanotechnologie sowie in deren Zusammenspiel mit anderen neuen Technologien. Er hat sich dementsprechend ebenfalls für eine erhebliche Steigerung der Fördermittel eingesetzt.

Im Folgenden wird auf Geschichte und Inhalte des visionären Diskurses eingegangen, der im Vorfeld, Rahmen und Umfeld der NNI entwickelt wurde. Konferenzen der NNI stehen auch noch im Jahr 2003 unter dem Motto „From Vision to Commercialization“. Zur Ausarbeitung einer Vision und Vorbereitung einer nationalen Strategie zur Nanotechnologie wurde im November 1996 eine „adhoc interagency group“ eingerichtet. Diese Arbeitsgruppe ging nicht nur von immensen wissenschaftlichen und ökonomischen Potenzialen der Nanotechnologie aus, sondern zudem von der Annahme, dass sie zu neuen Formen von Interdisziplinarität, ja zu einer neuen Einheit verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen führen könne. Die Gruppe entwickelte eine Vision, die sich auf „the novel system behaviour and manufacturability at the nanoscale and less on the advantages of smallness itself“ richtete. Diese Vision sollte disziplinenübergreifend sein, Beiträge aus allen relevanten Bereichen ermöglichen und langfristige Ziele haben (Roco 2002a, S. 31 f.).

Im Oktober 1998 wurde in Anknüpfung an die Ad-Hoc-Gruppe eine „Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology“ (IWGN) des „Committee on Technology“ (CT) des „National Science and Technology Council“ (NSTC) eingerichtet. Visionäre Aspekte spielen in dieser Gruppe, die u. a. die Förderung des wissenschaftlichen Diskurses (Roco et al. 2000) und die Information der Öffentlichkeit umfassten, eine wichtige Rolle. In einer Informationsbroschüre für die interessierte Öffentlichkeit (NSTC-IWGN 1999) wurden optimistische Einschätzungen der Nanotechnologie referiert, wie z. B. die Annahme, dass Nanotechnologie ähnlich umfassende soziale Auswirkungen haben werde wie fließend Wasser, Elektrizität, Antibiotika und die Mikroelektronik. Des Weiteren wurde darauf hingewiesen, dass einige Wissenschaftler Langfrist-Visionen zu nanotechnologisch geschaffenen Objekten entwickelt haben, die sich an ihre natürliche Umgebung anpassen (wie z. B. unsichtbare Flugzeuge, sich an Wetterverhältnisse anpassende Gebäude und Medikamente mit Antikörpereigenschaften). In einem von der IWGN im Jahr 1999 organisierten wissenschaftlichen Workshop bestand Konsens darüber, dass Nanotechnologie zur nächsten industriellen Revolution und zu einer Stärkung der interdisziplinären Verbindungen zwischen verschiedenen Wissenschaften führen werde (Roco et al. 2000). Zudem wurde geschätzt, dass im Jahr 2015 mithilfe von Nanotechnologie geschaffene Produkte insgesamt einen Wert von ungefähr einer Billion US-Dollar haben werden.

Am 10. März 1999 schlug die IWGN eine nationale Initiative zur Nanotechnologie vor (Roco 2002a, S. 32). In der Folgezeit entstanden die NNI und das „Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology“ (NSET) des NSTC/CT. Die Aktivitäten des NSET um-

[35] Eine Mitschrift der Rede ist zu finden unter http://clinton.archives.gov/publicpapers/publicpapers.html.

fassten u. a. die Organisation wissenschaftlicher Workshops. An der Organisation dieser Workshops beteiligten sich zudem die Europäische Kommission und das US-Handelsministerium. Da bei diesen Veranstaltungen auch zahlreiche Visionen optimistischer und pessimistischer Natur zur Sprache kamen, wird im Folgenden auf sie eingegangen. Im Einzelnen handelt es sich um einen Workshop, den das NSET im September 2000 zu den „Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology“ (Roco/Bainbridge 2001) durchführte, um einen von der NSF und dem US-Handelsministerium im Dezember 2001 ausgerichteten Workshop zum Thema „Converging Technologies for Improving Human Performance“ (Roco/Bainbridge 2002a) und schließlich um einen Workshop, den die NSF Anfang 2002 gemeinsam mit der Europäischen Kommission zum Thema „Nanotechnology – Revolutionary Opportunities & Societal Implications“ (Roco/Tomellini 2002) veranstaltete.

Auf den beiden Workshops zu gesellschaftlichen Implikationen der Nanotechnologie (Roco/Bainbridge 2001; Roco/Tomellini 2002)[36] kam eine Reihe von Kurzfrist-Visionen (mit einem Zeithorizont von nicht mehr als 15 Jahren) zur Sprache, die u. a. folgende zukünftige Möglichkeiten enthielten:

– neue, äußerst präzise Möglichkeiten der Entdeckung von Umweltgiften (mit den entsprechenden Auswirkungen auf die öffentliche Diskussion und politische Regulation),
– Entwicklung synthetischer innerer Organe und technischer Ersatz für Sinnesorgane,
– Steigerung der Zuverlässigkeit elektronischer Systeme durch präzisere Fertigungsmöglichkeiten,
– Textilien mit neuartigen Funktionen und Eigenschaften,
– erhebliche Ausweitung interdisziplinärer wissenschaftlicher Aktivitäten,
– Nutzung von schwer löslichen Substanzen und dadurch eine ungefähre Verdoppelung der Zahl chemischer Substanzen, die für die Herstellung von Medikamenten verwendet werden können,
– frühere Entdeckung und bessere Behandlungsmöglichkeiten von Krankheiten.

Langfrist-Visionen, die auf den beiden Veranstaltungen als realistisch eingeschätzt wurden, beinhalteten u. a. folgende mögliche Auswirkungen der technologischen Entwicklung (Roco/Bainbridge 2001; Roco/Tomellini 2002):

– Verbilligung und Leistungssteigerung im Bereich der Informationstechnik und dadurch Beschleunigung des Trends zum „Ubiquitous Computing“, wodurch langfristig z. B. Objekte in Serienfertigung über die Fähigkeit verfügen könnten, ihren Aufenthaltsort zu melden, und zur Konversation mit Maschinen (Künstliche Intelligenz);
– neue Möglichkeiten der „Telepräsenz“, also der technischen Realisierung der sinnlichen Wahrnehmung, an einem weit entfernten Platz „vor Ort“ zu sein (z. B. für Unterhaltungs- oder wissenschaftliche Zwecke);
– leistungsfähigere Weltraumsysteme nicht nur durch bessere Materialien, sondern langfristig auch durch Imitation von Charakteristika biologischer Systeme (wie z. B. Fähigkeiten zur Selbstreparatur und zur autonomen Anpassung an neue Umgebungen);
– permanente Überwachung des menschlichen Gesundheitszustands;
– punktgenaue Medikation;
– Fortschritte bei minimal-invasiven medizinischen Behandlungsmethoden;
– Scannen des ganzen Körpers bis zur Zellebene;
– Ersatz für verloren gegangene Gehirnfunktionen;
– Abmilderung altersbedingten Leistungsabbaus;
– Verbesserung menschlicher Fähigkeiten;
– verbesserte Ernteerträge;
– Erhöhung des Lebensstandards in den armen Ländern und Ermöglichung einer nachhaltigen Weltwirtschaft;
– verbesserte und ökologischere Möglichkeiten der Erzeugung und Nutzung von Energie (nicht nur durch Verbesserung bereits bestehender Technologien und Materialien, sondern langfristig auch durch nanotechnologische Artefakte wie z. B. solche, die natürliche Photosynthese imitieren können);
– Herstellung von nahezu unsichtbaren Artefakten, die zur Überwachung oder zu destruktiven Zwecken dienen können;
– Erhöhung der destruktiven Möglichkeiten kleiner Gruppen;
– neue Probleme im Bereich des Copyrights durch neuartige Möglichkeiten der Reproduktion von Objekten;
– Probleme bei der rechtlichen Regulierung von nanotechnologischen Artefakten und der mit ihnen durchgeführten Aktivitäten.

Des Weiteren wurden verschiedene Verbesserungen militärischer Möglichkeiten anvisiert (vgl. Kapitel IV).

Ein großer Teil der Visionen basiert nicht nur auf Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Nanotechnologie, sondern auch auf Annahmen zur Weiterentwicklung anderer Technologien (durch nanotechnologische Fortschritte). Eine besonders weit reichende Vision der Konvergenz verschiedener Technologien und ihrer Auswirkungen wurde auf dem von dem NSET und dem US-Handelsministerium ausgerichteten Workshop im Dezember 2001 (Roco/Bainbridge 2002a) entworfen. Leitidee dieser Veranstaltung war die Annahme, dass es auf

[36] Die vom US-Handelsministerium mitorganisierte Veranstaltung wird gesondert behandelt, da auf ihr das Thema der Konvergenz mehrerer Technologien sowie futuristische Vorstellungen eine weitaus größere Rolle spielten als auf den beiden anderen Workshops.

Basis des nanotechnologischen Fortschritts zur Integration und Synergie von vier Technologien kommt, die abgekürzt als „nano“, „bio“, „info“ und „cogno“ bzw. „NBIC“ bezeichnet werden. Dabei handelt es sich um Nano-, Bio- und IuK-Technologie sowie um „cognitive science“ (einschließlich „cognitive neuroscience“)[37]. Nach Auffassung der Veranstalter aus dem NSET (Roco/Bainbridge 2001) könnte durch die NBIC-Konvergenz ein Zeitalter der Innovation und des Wohlstands anbrechen, was einen Wendepunkt in der Entwicklung menschlicher Gesellschaften bedeuten würde. Mögliche Resultate der Entwicklung seien:

– improving work efficiency and learning

– enhancing individual sensory and cognitive capabilities

– revolutionary changes in health care

– improving both individual and group creativity

– highly effective communication techniques including brain-to-brain interaction

– perfecting human-machine interfaces including neuromorphic engineering

– sustainable and „intelligent“ environments including neuro-ergonomics

– enhancing human capabilities for defense purposes

– reaching sustainable development using NBIC tools

– ameliorating the physical and cognitive decline that is common to the aging mind

Sicherheit vor natürlichen sowie von Menschen verursachten Katastrophen sei möglicherweise ebenfalls (langfristig) zu erreichen. Zusammengefasst gehe es darum, menschliche Fähigkeiten auf der mikroskopischen, individuellen, Gruppen- und gesellschaftlichen Ebene zu verbessern.

[37] Die Thematik der NBIC-Konvergenz wird als Aufgabenbereich des Undersecretary of Commerce for Technology Phillip J. Bond genannt (vgl. http://www.ta.doc.gov/UnderSec.htm). Bond plädierte auf einer Veranstaltung der NNI am 23. Mai 2002 für eine Strategie der Hoffnung und des „Hype“ (hope and hype), um die Kommerzialisierung von Forschungsergebnissen voranzutreiben und das Interesse von Politik und Öffentlichkeit wach zu halten (vgl. Stuart 2002). Auf dem Workshop im Dezember 2001 (in Washington) hatte er dazu bereits Folgendes ausgeführt: „In all of this, at least as a policy person, I try to separate hype from hope. But the more I thought about that, the more I determined that in this political town, maybe the separation isn't at all that important, because hype and hope end up fueling the social passion that forms our policy. It gets budgets passed. It makes things possible for all of you. Without some passion in the public square, we will not achieve many of our goals. Those goals are mind-boggling – what we used to think of as miraculous – the deaf to hear, the blind to see, every child to be fed. And that's just for starters“ (Bond 2002, S. 30).

Auf dem Workshop wurden im Einzelnen u. a. folgende Visionen entwickelt (Roco/Bainbridge 2002b, S. 4 f. und 16):

– Fast, broadband interfaces directly between the human brain and machines will transform work in factories, control automobiles, ensure military superiority, and enable new sports, art forms and modes of interaction between people.

– Comfortable, wearable sensors and computers will enhance every person's awareness of his or her health condition, environment, chemical pollutants, potential hazards, and information of interest about local businesses, natural resources, and the like.

– Robots and software agents will be far more useful for human beings, because they will operate on principles compatible with human goals, awareness, and personality.

– Individuals and teams will be able to communicate and cooperate profitably across traditional barriers of culture, language, distance, and professional specialization, thus greatly increasing the effectiveness of groups, organizations, and multinational partnerships.

– The human body will be more durable, healthy, energetic, easier to repair, and resistant to many kinds of stress, biological threats, and aging processes.

– Machines and structures of all kinds, from homes to aircraft, will be constructed of materials that have exactly the desired properties, including the ability to adapt to changing situations, high energy efficiency, and environmental friendliness.

– A combination of technologies and treatments will compensate for many physical and mental disabilities and will eradicate altogether some handicaps that have plagued the lives of millions of people.

– Reverse engineering of the brain may be accomplished in the next two decades that would allow for better understanding of its functions.

– National security will be greatly strengthened by lightweight, information-rich war fighting systems, capable uninhabitated combat vehicles, adaptable smart materials, invulnerable data networks, superior intelligence-gathering systems, and effective measures against biological, chemical, radiological, and nuclear attacks.

– Anywhere in the world, an individual will have instantaneous access to needed information, whether practical or scientific in nature, in a form tailored for most effective use by the particular individual.

– The vast promise of outer space will finally be realized by means of efficient launch vehicles, robotic construction of extraterrestrial bases, and profitable

exploitation of the resources of the Moon, Mars, or near-Earth approaching asteroids.

– Agriculture and the food industry will greatly increase yields and reduce spoilage through networks of cheap, smart sensors that constantly monitor the condition and needs of plants, animals, and farm products.

– Transportation will be safe, cheap, and fast, due to ubiquitous realtime information systems, extremely high-efficiency vehicle designs, and the use of synthetic materials and machines fabricated from the nanoscale for optimum performance.

– Formal education will be transformed by a unified but diverse curriculum based on a comprehensive, hierarchical intellectual paradigm for understanding the architecture of the physical world from the nanoscale through the cosmic scale.

Die richtigen Entscheidungen und Investitionen vorausgesetzt, seien diese Visionen in nicht mehr als 20 Jahren zu erreichen, wodurch ein goldenes Zeitalter beginnen würde. Technologische Konvergenz könne der Rahmen für menschliche Konvergenz werden, und das 21. Jahrhundert könne in Weltfrieden, universellem Wohlstand und mit einem kulturellen Entwicklungssprung enden (Roco/Bainbridge 2002b). Am Ende des Jahrhunderts gliche die Menschheit dann einem einzigen Gehirn, dessen einzelne Teile räumlich verteilt („distributed“) und untereinander verbunden („interconnected“) sind.[38]

Als übergreifende Vision diente auf dem Workshop die Vorstellung, dass – basierend auf materieller Einheit auf der Nanoebene sowie technologischer Integration von dieser Ebene aus – eine Vereinigung von Wissenschaften stattfinden und dadurch deren weiterer schneller Fortschritt ermöglicht werde. So könne es zu einer „neuen Renaissance“ kommen, im Sinne der Entwicklung einer ganzheitlichen Sicht von Wissenschaft und Technologie und eines umfassendes Verständnisses der physischen Welt (Roco/Bainbridge 2002b).

3. Futuristische Visionen und Science-Fiction

Eine herausragende Rolle hinsichtlich utopisch anmutender Langfrist-Visionen zur Nanotechnologie spielt K. Eric Drexler. Drexler veröffentlichte Anfang der 1980er-Jahre Überlegungen zur Möglichkeit von Fertigungsprozessen auf der atomaren Ebene („molecular manufactoring“). Er gilt als Schöpfer des Begriffs Nanotechnologie. Mitte der 1980er-Jahre erschien sein einflussreiches Buch „Engines of Creation“ (Drexler 1986), weitere Publikationen mit teilweise stark visionären Zügen (z. B. Drexler/Peterson 1991) folgten.

[38] Diese Vorstellung ist auch aus Diskursen zum Internet bekannt: Durch die Möglichkeiten der netzbasierten Kommunikation entstehe – so die Annahme dort – eine „kollektive Intelligenz“ der Menschheit (vgl. Lévy 1997).

Kernstück seiner Überlegungen in Engines of Creation zu Nanofertigungsprozessen war die Annahme, dass zukünftig Nanomaschinen gebaut und zu vielfältigen Zwecken genutzt werden können. Solche Maschinen taufte Drexler „Assemblers“ und sagte voraus, dass sich mit diesen nahezu alles konstruieren lassen werde, was von den Naturgesetzen her möglich ist. Revolutionäre Fortschritte könnten so in vielen Bereichen möglich werden, es drohten aber auch große Gefahren: „Assemblers will open a world of new technologies. Advances in the technologies of medicine, space, computation, and production – and warfare – all depend on our ability to arrange atoms. With assemblers, we will be able to remake our world or to destroy it“ (Drexler 1986, S. 20).

Visionäre Diskurse über zukünftige Nanomaschinen werden bis heute von diesen gegensätzlichen Erwartungen einer grundlegenden, positiven Umgestaltung bzw. völligen Zerstörung der Welt geprägt. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Annahme, dass Nanomaschinen dereinst intelligent und selbstreplizierend sein könnten. Diese Annahme ist Grundlage einer Vielzahl von Langfrist-Visionen zur Nanotechnologie.

Zudem finden sich in Engines of Creation viele weitere Annahmen und Visionen, die ebenfalls noch in aktuellen visionären Diskursen auftauchen. Zu nennen sind hier z. B.:

– die Annahme, dass wir uns derzeit an einem Wendepunkt der Geschichte des Lebens auf der Erde befinden;

– die Langfrist-Visionen, dass in der Zukunft Menschheitsträume wahr werden, wie z. B. die Hinauszögerung oder gar Überwindung von Alter und Tod, telepathische Kommunikation, der freie Gestaltwandel menschlicher Körper und Füllhörner in Form von „utility fogs“ (womit Ansammlungen von Atomen und Nanomaschinen gemeint sind, aus denen nahezu beliebige makroskopische Produkte hervorgehen sollen);

– die Annahme, dass Probleme der technischen Zivilisation (wie z. B. Umweltverschmutzung) gelöst werden können;

– die Vision intelligenter Gebäude, die sich z. B. ans Wetter anpassen;

– die (mittlerweile als realistische Kurzfrist-Vision geltende) Hoffnung, dass sich Flächen oder Gegenstände selbst reinigen werden.

Ebenfalls schon in Engines of Creation finden sich aktuell diskutierte Schreckensvisionen wie z. B. die eines nanotechnologisch ermöglichten Überwachungsstaates oder eines Weltuntergangs, in der Folge der rasanten Ausbreitung selbstreplizierender, intelligenter und zerstörerischer Nanomaschinen (Drexler 1986) – ein Problem, das in den Diskursen über Nanotechnologie oft als „gray goo problem“ bezeichnet wird. Drexler war (mit seinen Überlegungen zu den Potenzialen von Robotik, Biotechnologie, Künstlicher Intelligenz und Nanotechnologie) auch Vor-

reiter aktueller visionärer Diskurse zum zukünftigen Zusammenspiel neuer Technologien.

Drexler gründete das Foresight Institute[39], dessen Arbeit das öffentliche Bild der Nanotechnologie in nicht unerheblichem Maße mitprägt. An diesem Institut und in seinem Umfeld arbeitet eine Reihe weiterer Wissenschaftler, die sich an visionären Diskursen und der Forschung zur Nanotechnologie sowie zu anderen neuen Technologien beteiligen. Zu nennen ist hier z. B. Ray Kurzweil, der in seinem Buch „The Age of the Spiritual Machines“ (Kurzweil 1999) die Vision eines 21. Jahrhunderts entwirft, das durch eine rapide fortschreitende Verschmelzung von Mensch und Maschine gekennzeichnet ist. Diese Entwicklung wird von Kurzweil nicht als unproblematisch dargestellt, insgesamt gesehen handelt es sich bei seiner Vision aber um eine optimistische. Des Weiteren teilt seit längerem Marvin Minsky, bekannt vor allem durch seine Arbeiten zur Künstlichen Intelligenz, Drexlers Visionen zur Zukunft der neuen Technologien. Ein weiterer Forscher im Umkreis von Drexler ist der Informatiker Ralph Merkle, Vizepräsident des Foresight Institute und Gründer der Firma Zyvex, die sich der Entwicklung der von Drexler visionierten Nanofabriken verschrieben hat und sich selbst als „erstes Start-up“ der molekularen Nanoära sieht (Krempl 2001). Merkle propagiert u. a. Langfrist-Visionen zur Entwicklung einer schadstofffreien, nanotechnologischen Produktionsweise, durch die das Problem der Umweltverschmutzung gelöst werden könne.

Die genannten Forscher sind Sympathisanten oder Teil der soziokulturellen Gruppierung der Extropier, die sich als Speerspitze der Transhumanisten versteht (Basler & Hofmann 2002, S. 72 f.; Freyermuth 1997; Krempl 2001; Regis 1994).[40] Diese beiden eng miteinander verflochtenen (und maßgeblich von Max More, dem Vordenker der Extropier geprägten) Gruppierungen werden von Kritikern als ideologisch verblendete, utopistische Bewegung betrachtet. Sie selbst verstehen sich als Avantgarde des wissenschaftlichen Fortschritts sowie als Vorkämpfer einer „neuen Aufklärung“ und grenzen sich sowohl von Strömungen des religiösen Fundamentalismus als auch von der intellektuellen Postmoderne ab (More 1996, 1997 u. 2003). Als Demonstration ihres Willens zur Selbsttransformation gaben sich Vordenker der Extropier neue Namen. Beispiele dafür sind Max More („Max Mehr“) und Tom Morrow („Tomorrow“). Sie gründeten 1988 die Zeitschrift Extropy, benannt nach einem von Tom Morrow geschaffenen Kunstwort, das metaphorisch als Gegensatz zur Entropie gedacht ist, also gegen die Tendenz der Materie zu Unordnung und Zerfall gerichtet. In aktuellen Texten der Gruppe wird Extropie als „extent of a system's intelligence, information, order, vitality, and capacity for improvement“ (More 2003) definiert.

Extropier und Transhumanisten streben mit technischen Hilfsmitteln das ewige Leben an, zum Teil durch „Kryonik“, das Einfrieren von ganzen Leichen oder von Köpfen, zum Teil aber auch durch eine futuristische Nanotechnologie (in Kombination mit Informations- und Biowissenschaften). Eines ihrer Zukunftsbilder enthält Nanoroboter, die das menschliche Gehirn Atom für Atom auseinandernehmen und in identischer Form wieder zusammensetzen. Extropier und Transhumanisten beabsichtigen, menschliche Grenzen mit technologischer Hilfe zu überschreiten. Dazu gehört auch die Verschmelzung von Mensch und Maschine. Zudem kann nach ihrer Auffassung die Menschheit langfristig durch Umprogrammierung des genetischen Codes ihren Charakter als einheitliche Spezies verlieren. Die Zukunft werde denjenigen gehören, die das beste Programm aufweisen (Basler & Hofmann 2002, S. 72).

Weitere Visionen sind die Ausdehnung der maximalen Lebensspanne auf 250 Jahre in den nächsten Jahrzehnten und langfristig sogar Unsterblichkeit[41], eine erhebliche Verbesserung von Sinneswahrnehmungen[42] sowie tiefgreifende technische Manipulationen der Sexualität von frei wählbaren Erregungszuständen über den Umbau der Sexualorgane bis hin zur freien Wahl des Geschlechtes und zur Schaffung neuer Geschlechter (Freyermuth 1997). Diese Visionen verbinden sich mit einer libertären politischen Philosophie, die zentralisierte Macht ablehnt und sich z. B. gegen Steuern und ein staatliches Rechtssystem ausspricht. Als intellektuelle Ahnherren reklamieren die Extropier u. a. Adam Smith und Friedrich Nietzsche für sich.[43]

Im Gegensatz zu den Extropiern, die den genannten Langfrist-Visionen ernsthaft anhängen und zum Teil beträchtliche Ressourcen für ihre Verwirklichung bereitstellen, werden die Visionen in der Science-Fiction spielerisch aufgegriffen und weiterentwickelt. Dieses Genre hat eine wichtige Rolle bei der Popularisierung von Nano-

[39] Siehe http://www.foresight.org. Dort erhält man u. a. Zugang zu Veröffentlichungen Drexlers und anderer Wissenschaftler und zu einer Reihe von Informationen, die hinsichtlich der visionären sowie ethischen Diskurse zur Nanotechnologie von Interesse sind.

[40] Einen guten Einstieg in die Beschäftigung mit diesen soziokulturdllen Bewegungen bietet ein Konferenzbericht von 1997 in dem Internetmagazin Telepolis (Freyermuth 1997). Dort finden sich auch mehrere Links zu Texten von Extropiern und über die beiden Bewegungen. Die wichtigste Webpräsenz der Extropier ist http://www.extropy.org.

[41] Zum Beispiel durch digitale Speicherung des menschlichen Bewusstseins bzw. individueller Gedächtnisinhalte im Netz („Upload“) oder durch einen vollständigen Stopp biologischer Alterungsprozesse.

[42] Zum Beispiel in Form von Radarsicht oder eines Gehörs, das über die Fähigkeiten heutiger Abhörtechnologien verfügt

[43] Auch Anhänger der Idee einer baldigen Weltraumbesiedlung setzen große Hoffnungen in die Nanotechnologie, besonders wenn sie zugleich „transhumanistisch“ orientiert sind. Neben realistisch wirkenden Visionen zur Raumfahrttechnik findet sich bei ihnen eine Vielzahl utopisch anmutender Vorstellungen, wie z. B. die einer Transformation des menschlichen Körpers, der diesen an die lebensfeindlichen Weltraumbedingungen anpasst. Langfrist-Visionen zur Nutzung von Nanotechnologie für die Weltraumerschließung werden auch seit längerem am Foresight Institute und in dessen Umfeld entwickelt (Merkle 1990). Diese erregten zeitweilig auch das Interesse der NASA. Bereits Ende der 20er-Jahre des vergangenen Jahrhunderts publizierte der Physiker John Desmond Bernal Überlegungen zur Weltraumbesiedlung und zur technologischen Transformationen des menschlichen Körpers, die später u. a. von Freeman Dyson aufgegriffen wurden (Schäfer 1994, S. 53 ff.).

technologie gespielt und schon früh eigene Visionen entwickelt (Collins 2001; Vogel 2001): In dem Film „Fantastic Voyages“ aus den 1960er-Jahren, zu dem Isaac Asimov einen Roman verfasste, reisen Nanoroboter durch die menschliche Blutbahn, in „Star Trek“ tragen Blinde Brillen, die Bilder direkt ins Gehirn übertragen, Menschen und ihre Ausrüstung werden sekundenschnell aufgelöst und wieder zusammengesetzt und so durch den Weltraum transportiert.[44] Roboter in Filmen sind oft nicht von Menschen zu unterscheiden, mit technischen Mitteln erreichte menschliche Unsterblichkeit ist ein häufiges Thema. In einer „Star Trek“-Episode von 1989 entwickeln sich aus Versehen freigesetzte Nanoroboter zu einer Gesellschaft, die zu einer unsichtbaren Bedrohung der Systeme des Raumschiffs Enterprise wird. Literarische Vorläufer dieser Vision vom Menschen geschaffener, spontan gesellschaftsbildender Kleinstwesen finden sich in den 1940er-Jahren (bei Theodore Sturgeon) und in den frühen 1980er-Jahren (bei Greg Bear). Das präzise Manipulieren einzelner Atome (durch Psychokinese) findet sich in Frank Herberts „Dune“ von 1965. Stanislaw Lem entwickelte in den 1980er-Jahren Visionen von winzigen Waffensystemen sowie von einer nanotechnologisch präparierten Umwelt, in der beispielsweise ein als Mordwaffe gezücktes Messer von selbst zu Staub zerfällt (Springer 2001).

Im Verlauf der 1990er-Jahre ließen sich Greg Bear (z. B. „Queen of Angels“ von 1990, „Slant“ von 1997), Neil Stephenson („Diamond Age“ von 1995)[45] und eine Reihe weiterer Science-Fiction-Autoren durch Visionen Drexlers und anderer Futuristen inspirieren (Collins 2001). Beschrieben werden Gesellschaften, die durch Nanotechnologie grundlegend verändert wurden. Ein Schwerpunkt liegt auf den Möglichkeiten, die sich aus der Nanotechnologie für den Alltag und das Individuum ergeben könnten. Insbesondere bei Stephenson wird dabei an Ideen angeknüpft, die aus der – von ihm selbst mit dem Roman „Snow Crash“ (1992) mitgeprägten – „Cyberpunk“-Literatur (zu den zukünftigen Möglichkeiten der IuK-Technik) stammen. Die Protagonisten der Romane haben z. B. Nanowaffenimplantate oder in den Körper eingebaute Musiksysteme. Des Weiteren stößt man in der Science-Fiction-Literatur der 1990er-Jahre auf Jets, die ohne herkömmliche Tragflächen auskommen, weil Nanogeräte durch eine Vielzahl winziger Flügel oder Höcker ihren Auftrieb steuern, auf riesige nanotechnologische Produktionswerke, aber auch (bei Tony Daniel) auf die Darstellung einer Welt, in der ein Großteil des Festlandes von Leben vernichtenden „Nanoplasmen“ bevölkert wird (Collins 2001). Vor kurzem hat der Bestseller-Autor Michael Crichton einen Roman mit dem Titel „Prey“ veröffentlicht, zu dem derzeit auch ein Film entsteht. In diesem Roman entwickeln sich Nanoroboter zu einer Gefahr für die Menschheit.

Pessimistische Langfrist-Visionen zur Nanotechnologie wurden in hohem Maße von einem Artikel Bill Joys aus dem Jahr 2000 (Joy 2000) geprägt. Im Zuge der durch diese Veröffentlichung ausgelösten Debatte über die langfristigen Auswirkungen neuer Technologien[46] kam es zu einer Popularisierung des Themas Nanotechnologie mit Auswirkungen auch auf wissenschaftliche und politische Debatten. Im Gegensatz zu den überwiegend positiv gestimmten Visionen von Drexler und Kurzweil entwarf Joy in seinem Artikel ein düsteres Zukunftsszenario. Danach werden Robotik, Gentechnik und Nanotechnologie die Welt, wie wir sie kennen, fundamental verändern: Maschinen übertreffen den Menschen immer weiter an Leistungsfähigkeit, dessen Abhängigkeit von Maschinen wächst. Macht konzentriert sich bei einer kleinen Elite, die in der Lage ist, diese Maschinen zu kontrollieren. Maschinen machen den Menschen überflüssig und bedrohen die Existenz der Menschheit. Die Fähigkeit künstlicher Geschöpfe zur Selbstreplikation potenziert deren mögliche Gefahren. Die von Drexler zuerst beschriebene und von Joy aufgegriffene Schreckensvision selbstreplizierender Nanoroboter mündet in die Vorstellung, die gesamte Biosphäre könnte zerstört werden („gray goo problem“).

Angesichts dieser denkbaren Risiken plädiert Joy dafür, auf die Weiterentwicklung der angesprochenen Technologien zu verzichten. Er stellt zudem die von Drexler und Kurzweil formulierten Zielvorstellungen infrage: „Ein technischer Zugang zur Ewigkeit – zu annähernder Unsterblichkeit durch Robotik – ist vielleicht gar keine wünschenswerte Utopie und birgt eindeutig große Risiken. Vielleicht sollten wir die Wahl unserer Utopien überdenken“ (Joy 2000). Auf ähnliche Weise wie Drexler und Kurzweil geht er also davon aus, dass sich Leben, wie wir es heute kennen, durch Nanotechnologie in absehbarer Zeit fundamental wandeln wird.

Die Publikation, die in dem populären Online-Magazin Wired erschien, fand international ein Echo in den Medien (Basler & Hofmann 2002, S. 72; Schirrmacher 2001a) und der Wissenschaft. In der Frankfurter Allgemeinen Zeitung z. B. wurden über mehrere Monate hinweg kontroverse Beiträge zu Joys Thesen veröffentlicht. Kurzweil betonte die Chancen, die mit der Weiterentwicklung neuer Technologien verbunden seien. Zudem handele es sich bei der Nanotechnologie um eine Querschnittstechnologie, die nicht scharf definiert sei und damit auch kein klar umrissenes Verbot erlaube. Durch Verbote ließen sich neue technische Entwicklungen nicht verhindern, sondern würden nur in einen kaum mehr kon-

[44] Bekundungen von Bill Joy und anderen am Diskurs über Nanotechnologie Beteiligten machen deutlich, dass sich viele Wissenschaftler in den USA – wohl im Gegensatz zu europäischen Wissenschaftlern – öffentlich dazu bekennen, dass sie durch Science-Fiction biographisch entscheidend geprägt wurden (Schirrmacher 2001b).

[45] Der Titel seines Romans bezieht sich auf die Hoffnung, durch eine „molekulare Nanotechnologie“ der Zukunft atomar präzise arbeiten zu können und dadurch Materialien wie z. B. Diamant einfach herstellen und verwenden zu können.

[46] Eine deutsche Übersetzung des Aufsatzes, Beiträge zur „Joy-Debatte“ und weitere Beiträge zur Zukunft der Nanotechnologie finden sich in: Schirrmacher (2001a).

trollierbaren Untergrund gedrängt. Stattdessen plädiert er für ausreichende gesellschaftliche Kontrollen und Gestaltung. Eine denkbare Vorsichtsmaßnahme wäre, Nanoroboter so zu konstruieren, dass sie jederzeit von einem Ort aus deaktiviert werden können (Broadcast- bzw. Punkt-zu-Mehrpunkt-Architektur). Merkle verwies auf Unterschiede zwischen selbstreplizierenden biologischen und nanotechnologischen Systemen: Nanotechnologische Systeme seien nicht zu komplexem autonomen Handeln in der Lage und weit weniger anpassungsfähig als biologische Organismen.

Joys Warnungen wurden aber nicht nur von „nanoistischen“ Autoren aus dem Umkreis des Foresight Institute zurückgewiesen. So hält z. B. der Nobelpreisträger und Nanotechnologie-Experte Richard E. Smalley das „gray goo problem“ für eine unmögliche, kindische Phantasie (Smalley 2001, S. 116). Besonders gegen Joys pessimistischen Futurismus wird die Auffassung vertreten, dass Roboter (zumindest auf sehr lange Sicht) nicht über die drei Fähigkeiten verfügen werden: sich in der natürlichen Umwelt zu bewegen, chemisch komplexe Umgebungen zu erkennen sowie sich selbst zu replizieren (Vogel 2001, S. 147).

4. Zusammenfassung

Nanotechnologie ist ein hochgradig visionäres Thema. Sowohl Langfrist-Visionen mit einem Zeithorizont von (z. T. wesentlich) mehr als 15 Jahren als auch kurzfristigere Visionen, die im besonderen Maße im Umfeld der US-amerikanischen „National Nanotechnology Initiative (NNI)“ entwickelt werden, prägen im Guten wie im Schlechten das Bild der Technologie in der interessierten Öffentlichkeit.

Zu unterscheiden sind zumindest zwei visionäre Diskurse: zum einen der in Forschungspolitik, Wissenschaft und Wirtschaft stattfindende Diskurs über die Potenziale der Nanotechnologie, in dem es vor allem um relativ realistisch anmutende, kurzfristige Visionen geht, zum anderen der stark futuristische – und überwiegend sehr optimistische – Diskurs im Umfeld des von K. Eric Drexler gegründeten „Foresight Institute“. Dessen Grundannahmen zur zukünftigen Entwicklung werden auch von futuristischen Pessimisten wie Bill Joy geteilt.

Die Visionen Drexlers, Joys und anderer extremer Futuristen – aber auch einige der im Umfeld der NNI entwickelten – beruhen zum großen Teil auf Annahmen zum zukünftigen Zusammenwirken mehrerer neuer Technologien. Gerade durch solche Visionen zur Konvergenz verschiedener Technologien werden Hoffnungen auf umfassende und tiefgreifende Veränderungen der Bedingungen menschlicher Existenz beflügelt.

Der technologische Futurismus malt eine Zukunft aus, in der alte Menschheitsträume (wie z. B. die Überwindung von Armut, Mangel und Tod) wahr werden. Pessimistische Futuristen warnen jedoch vor möglichen großen Gefahren als Folge der technologischen Entwicklung. Eine besonders bedrohliche Vision ist dabei die Vorstellung einer Vernichtung allen Lebens auf der Erde durch selbstreplizierende Nanoroboter („gray goo problem“). Diese bereits in den 80er-Jahren von Drexler popularisierte Zukunftstechnologie spielt auch in Visionen einer zukünftigen Welt allgemeinen Wohlstands eine zentrale Rolle. Viele Wissenschaftler betrachten solche Visionen zu selbstreplizierenden Nanorobotern mit großer Skepsis.

Die Skepsis gegenüber dem Futurismus von Autoren wie Drexler, Joy und Ray Kurzweil sollte aber nicht den Blick darauf verstellen, dass auch im Umfeld der NNI eine Reihe sehr weit reichender optimistischer Visionen entwickelt wurde (vgl. Tabelle 15, S. 154).

Die Begeisterung, die optimistische futuristische Visionen wecken können, wird in den USA bewusst als Mittel zur Förderung der Technologieentwicklung eingesetzt, in einer Strategie des „hope and hype“. Eine solche Strategie ist aber immer eine Gratwanderung. Neben positiven Effekten dieser Strategie (wie z. B. Anreize für den wissenschaftlichen Nachwuchs, sich in diesem Bereich zu qualifizieren, oder das Wecken sowie Wachhalten von politischen und wirtschaftlichem Interesse) sind auch negative Konsequenzen denkbar: So besteht zum einen die Gefahr, dass die Erwartungen an Nanotechnologie zu hochgeschraubt und Enttäuschungen dadurch unvermeidlich werden. Zum anderen kann unbeabsichtigterweise auch die Kehrseite des optimistischen Futurismus – ein mit Weltuntergangsängsten und Schreckensvisionen verbundener pessimistischer Futurismus – popularisiert werden.

Eine kritische Auseinandersetzung mit den Schreckensvisionen wäre, selbst wenn sie deren Popularität zunächst noch vergrößerte, ein wichtiger Beitrag zu einer rationalen, problemadäquaten Diskussion über Chancen und Risiken der Nanotechnologie. Problematisch ist allerdings, dass eine solche Auseinandersetzung intellektuelle und materielle Ressourcen binden würde, die dann möglicherweise bei der Einschätzung dringlicher erscheinender Probleme der Technikfolgenabschätzung im Bereich Nanotechnologie (wie z. B. den Auswirkungen gesundheitlicher und ökologischer Auswirkungen von Nanopartikeln oder den ethischen Konsequenzen nanotechnologischer Anwendungen in der Medizin) fehlen.

Tabelle 15

Langfrist-Visionen, die im Umfeld der US-amerikanischen National Nanotechnology Initiative (NNI) geäußert wurden (Zeithorizont: 15 Jahre oder länger)

Themenfeld	Visionen
Ökologie	Ökologisch unbedenkliche, effiziente Möglichkeiten der Erzeugung und Nutzung von Energie durch nanotechnologische Artefakte (z. B. solche, die natürliche Photosynthese imitieren können); Beseitigung kleinster Mengen von Umweltgiften und umfassende Reinigung der natürlichen Umwelt; saubere, Ressourcen schonende Produktion durch Konstruktion auf der Nanoskala.
Landwirtschaft/ Nahrungsmittel	Landwirtschaft und Nahrungsmittelindustrie werden in großem Ausmaß Erträge steigern und Abfallmengen reduzieren. Dies wird durch Netzwerke billiger und leistungsfähigerer („smart“) Sensoren möglich, die ständig den Zustand und die Bedürfnisse von Pflanzen, Tieren und landwirtschaftlichen Produkten überwachen. Erhöhung des Lebensstandards in armen Ländern.
Informationstechnik	Verbilligung und Leistungssteigerung im Bereich der Informationstechnik und dadurch Beschleunigung des Trends zum Ubiquitous Computing, wodurch langfristig z. B. Objekte in Serienfertigung über die Fähigkeit verfügen könnten, ihren Aufenthaltsort zu melden, und zur Konversation mit Maschinen (Künstliche Intelligenz); bequem tragbare Sensoren und Computer zur Überwachung des eigenen Gesundheitszustands sowie zur Information über die Umgebung (z. B. Luftqualität, Freizeitangebote etc.); neue Möglichkeiten der Telepräsenz, also der technischen Realisierung der sinnlichen Wahrnehmung, an einem weit entfernten Platz „vor Ort“ zu sein (z. B. für Unterhaltungs- oder wissenschaftliche Zwecke); schnelle Breitband-Interfaces zwischen menschlichem Gehirn und Maschinen, die u. a. in Fabriken, bei der Kontrolle von Fahrzeugen und für neue Arten der Interaktion (z. B. in Sport und Kunst) nützlich sein könnten.
Gesundheit	Permanente Überwachung des menschlichen Gesundheitszustands; Nutzung von schwer löslichen Substanzen (und dadurch eine Vermehrung der Zahl chemischer Substanzen, die für die Medikamentenherstellung verwendet werden können); punktgenaue Medikation; Fortschritte bei minimal-invasiven medizinischen Behandlungen; Scannen des ganzen Körpers bis zur Zellebene; technischer Ersatz für Sinnesorgane; Entwicklung synthetischer innerer Organe; Abmilderung altersbedingten Leistungsabbaus; Verbesserung menschlicher Fähigkeiten durch Implantate (z. B. Radarsicht); Nachbau („reverse engineering“) des Gehirns und dadurch ein besseres Verständnis seiner Funktionen; technischer Ersatz für verloren gegangene Gehirnfunktionen.
innere Sicherheit	Herstellung von nahezu unsichtbaren Artefakten, die zur Überwachung oder zu destruktiven Zwecken dienen können; Erhöhung der destruktiven Möglichkeiten kleiner Gruppen.
Weltraum	Konstruktion außerirdischer Stützpunkte durch Roboter; Ausbeutung von Rohstoffen auf dem Mond und anderen Himmelskörpern; ständige unbemannte Präsenz außerhalb unseres Sonnensystems; leistungsfähigere Weltraumsysteme nicht nur durch bessere Materialien, sondern auch durch Imitation von Charakteristika biologischer Systeme (wie z. B. Fähigkeiten zur Selbstreparatur und zur autonomen Anpassung an neue Umgebungen).

Quelle: eigene Darstellung

IX. Chancen und Risiken der Nanotechnologie

Die Nanotechnologie gilt als Basisinnovation, von der Anstöße zu innovativen Entwicklungen in den verschiedensten technologischen Bereichen und gesellschaftlichen Anwendungsfeldern erwartet werden. Damit verbunden wird die Hoffnung sowohl auf bedeutende Umsatzpotenziale in fast allen Branchen der Wirtschaft als auch auf positive Auswirkungen in den Bereichen Umwelt und Gesundheit. Zugleich wird aber auch auf die Möglichkeit negativer Folgen für Umwelt und Gesundheit (vor allem durch unkontrollierte Freisetzung von Nanopartikeln) hingewiesen, und es werden aus ethischer Sicht beispielsweise Fragen zum Selbstverständnis des Menschen im Zusammenhang mit verbessernden Eingriffen am menschlichen Körper aufgeworfen.

Den genannten Fragen wird in diesem Kapitel nachgegangen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Auswirkungsanalysen angesichts des – insgesamt gesehen – noch frühen Entwicklungsstadiums der Nanotechnologie mit großen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden sind.

1. Wirtschaftliche Aspekte

Die enormen Innovationspotenziale und die damit verbundenen ökonomischen Chancen der Nanotechnologie führten in den 1990er-Jahren dazu, dass in allen wesentlichen Industrieländern entsprechende Förderprogramme aufgelegt wurden. Sie konzentrieren sich sowohl auf die Förderung der Grundlagenforschung als auch auf die Unterstützung anwendungsorientierter Forschung, mit der sich die Hoffnung auf schnelle Umsetzung in marktfähige Produkte und Prozesse verbindet. Zwar steckt die Marktdurchdringung von nanotechnologischen Verfahren und Produkten noch ziemlich in den Anfängen, jedoch hat eine Reihe von Produkten und Verfahren bereits den Weg in den Markt gefunden. Die derzeitige und zukünftige Marktpenetration der Nanotechnologien wird in der Literatur allerdings sehr unterschiedlich beurteilt. Zu unterscheiden sind dabei die direkten Umsätze mit Nanokomponenten und die Umsätze mit Produkten, in denen Nanotechnologien inkorporiert sind.

Das Datenmaterial zur wirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie ist – nicht nur in Deutschland, sondern auch in anderen Ländern, die eine zentrale Wettbewerbsposition einnehmen – noch sehr lückenhaft. Eine allgemein anerkannte breite Datenbasis ist bisher noch nicht erarbeitet worden bzw. liegt nicht öffentlich zugänglich vor. In derzeitigen öffentlichen Wirtschaftsstatistiken ist Nanotechnologie nicht als gesonderte Kategorie erfasst. Im Rahmen einer vom BMBF in Auftrag gegebenen ersten Erhebung durch das VDI-Technologiezentrum (Bachmann 1998) wurde für das Jahr 2001 ein Weltmarktvolumen quantifizierbarer Produkte von ca. 54 Mrd. Euro als Untergrenze geschätzt. Berücksichtigt wurden Produkte, die aus der Sicht von Experten eine hohe industrielle Bedeutung besitzen.

Die VDI-TZ-Erhebung aus dem Jahr 1998 dient immer noch als Ausgangsbasis für kürzlich veröffentlichte Untersuchungen aus der Finanzwelt, die ebenfalls noch rudimentär bleiben, da sie auf Teilbereiche wie z. B. die Chemie fokussieren oder eher allgemeine Tendenzen aufzeigen (vgl. u. a. DG Bank/GZ Bank 2001; Jankowski 2001).

Das VDI-TZ hat im Jahr 2001 einen weiteren (vorläufigen) Schritt hin zu einer präzisierten Marktrecherche durchgeführt (Bachmann 2001). Generell konnte bei der Recherche festgestellt werden, dass in den wenigsten Bereichen ein exklusiver Nanotechnologiemarkt besteht. Vielmehr führt der Einfluss nanotechnologischer Systembausteine zu einer Verbesserung bestehender Produkte. Daher kann korrekterweise bei den verschiedenen Produktgruppen nur ein durch nanotechnologische Entwicklungen beeinflusstes Marktvolumen angegeben werden. Oftmals sind es jedoch spezielle einzelne Komponenten in einem System, die den Markterfolg garantieren. Die kleinste am Markt verkaufbare Einheit ist das Gesamtsystem und somit ist nur für dieses der Marktwert zu beziffern (VDI/FhG-INT 2002, S. 103).

Derzeit läuft eine weitere vom BMBF in Auftrag gegebene Studie zum Thema „Wirtschaftliches Potenzial der Nanotechnologie“. Auftragnehmer sind VDI-Technologiezentrum/Zukünftige Technologien Consulting und Deutsche Bank/Innovationsteam Mikrotechnologie.

Der Einfluss nanotechnologischer Erkenntnisse auf verkaufbare Produkte besteht schon seit Jahren in den Bereichen Elektronikherstellung, Datenspeicherung, funktionelle Schichten oder Präzisionsoptiken. In den letzten Jahren sind nanotechnologische Erkenntnisse zunehmend auch in die Biologie, Chemie, Pharmazie und Medizin eingeflossen, und dieser Trend wird voraussichtlich weiter anhalten. Bereits heute sind deutliche Einflüsse nanotechnologischer Erkenntnisse auf Milliardenmärkte bei der Pharmakaherstellung, medizinischen Diagnostik, Analytik oder bei chemischen und biologischen Katalysatoroberflächen zu erkennen. Speziell in den Bereichen Pharmaka-Screening, Biochips und bei der analytischen Unterstützung industrieller Entwicklungen besteht ein deutlich wachsendes Industrieinteresse (VDI/FhG-INT 2002, S. 104).

Auch in einer Studie des Bankhauses Sal. Oppenheim jr. & Cie. wird festgestellt, dass letztlich die Hebelwirkung der neuen Technologie als entscheidend für das Marktvolumen anzusehen ist. Wesentlich seien nicht der direkte Umsatz und Gewinne, die mit Nanotechnologieprodukten selbst erzielt würden, sondern die vielfältigen Auswirkungen der Technologie in verschiedensten Anwendungsbereichen. Unternehmen, die sich auf Nanotechnologie konzentrieren, seien gezwungen, den schwierigen Übergang von der wissenschaftlichen Forschung zum Massengeschäft zu meistern. Als hilfreich werde sich dabei oft die Entwicklung strategischer Partnerschaften erweisen. Für Konzerne seien die aktuellen Marktpotenziale noch gering. An Nanotechnologie werde geforscht, die Umsetzung

aber noch nicht vorangetrieben. Die inzwischen aufgebauten Ressourcen in Forschungs- und Entwicklungsabteilungen könnten jedoch aktiviert werden, um innerhalb kurzer Frist in den Markt einzusteigen. Die Untersuchung von Sal. Oppenheim jr. & Cie. zur Nanotechnologie schließt mit dem Fazit: „Die Gefahr besteht, dass aufgrund zu hoher Erwartungen und spektakulärer Darstellung in den Medien ein falscher Erwartungshorizont in der Öffentlichkeit geweckt wird. Die Nanotechnologie wird in vielen Bereichen der Industrie und im privaten Lebensumfeld zu Veränderungen führen, doch diese werden häufig eher diskreten Einzug halten und nur dem Experten wird die dahinterstehende Basistechnologie bekannt sein" (Jankowski 2001).

In den folgenden Abschnitten soll anhand vorliegender Schätzungen für ausgewählte Bereiche ein Eindruck von den Marktpotenzialen der Nanotechnologie vermittelt werden.

1.1 Halbleiter und optoelektronische Systeme

Erkenntnisse aus der Nanotechnologie haben bisher noch wenig Einfluss auf die Umsatzzahlen für den Bereich der elektronischen Geräte. Jedoch ist deren Wertschöpfung eng mit Fortschritten der Halbleitertechnik verknüpft, sodass mittelfristig der Markterfolg durch frühzeitige Umsetzung nanotechnologischer Erkenntnisse stark beeinflusst werden kann. Nach Dataquest (2003) soll der weltweite Umsatz bei Halbleiterchips im Jahr 2004 auf ca. 300 Mrd. US-Dollar steigen, wobei der Anteil der Gerätetechnik für die Herstellung und die Kontrolle der Mikrochips auf 65 Mrd. US-Dollar geschätzt wird. Die hierin enthaltenen und stark von Nanotechnologie geprägten Belichtungsmaschinen für die Chipherstellung (Stepper) weisen ein Umsatzvolumen von 6,2 Mrd. US-Dollar, die eingebauten Präzisionsoptiken allein ein Marktpotenzial von 1,7 Mrd. US-Dollar auf. Dieses Beispiel macht deutlich, dass die Hebelwirkung der Nanotechnologie tatsächlich erheblich sein kann.

Nach Auffassung von Siemens (2003), Dataquest (2003) und ElectroniCast (2003) betrug der Weltmarkt für optoelektronische Systeme 2002 ca. 2,5 Mrd. US-Dollar. Darunter fallen optische Festplattenspeicher, Optokoppler, Laserkomponenten und optische Datenübermittler. Diese Angaben beinhalten nicht den Markt für Laserdioden. LEDs, Optokoppler und Laserdioden sind stark von nm-Schichtsystemen beeinflusst. Laser Focus World (2000) gibt allein für die im Jahr 2000 verkauften Laserdioden ein Volumen von 4,3 Mrd. US-Dollar an. Deren Einsatzfelder sind neben der Datenspeicherung (CD und DVD), Telekommunikation und Unterhaltungselektronik die Materialbearbeitung, die medizinische Therapie und Diagnostik, die Inspektion und die Qualitätskontrolle. Für optische Sensoren werden spezielle Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSEL) eingesetzt, welche auf Nanostrukturbasis arbeiten. 1999 betrug deren Marktvolumen noch 100 Mio. US-Dollar, erwartet wird jedoch ein Anwachsen in den nächsten drei bis fünf Jahren auf über 1 Mrd. US-Dollar (NSTC 2000).

1.2 Chemie und Katalysatoren

Die Bedeutung der Katalyse für die Chemische Industrie ist groß; 90 % der chemischen Produktionsprozesse basieren auf Katalyse. Das Chemical Institute of Canada gab 1999 den Wert der durch Katalyse erzeugten Chemikalien weltweit mit 900 Mrd. US-Dollar an. Die Marktbedeutung der Katalysatoren liegt in den durch ihre Nutzung verursachten günstigen Produktionskosten, welche durch ein besseres Verständnis der atomaren Abläufe bei der Katalyse und eine dadurch steuerbare Effektivitätssteigerung noch deutlich verbessert werden können (Abbildung 36; Kapitel V.2.2).

Die NNI-Studie (NSTC 2000) weist für Zeolith-Katalysatoren zur Kohlenwasserstoffumwandlung ein Volumen für die Erdölverarbeitung in Höhe von 30 Mrd. US-Dollar aus. Für das Gebiet der Festkörperkatalysatoren wird gar ein Gesamtmarktvolumen von 210 Mrd. US-Dollar angegeben.

Der Biokatalysatormarkt wird von Cuttor für 1999 auf 1,5 Mrd. US-Dollar geschätzt (Cuttor 1999). Auf weit weniger beziffert die Schnell Publishing Company (Landau 1999) den Markt für Biokatalysatoren, und zwar nur auf 100 bis 130 Mio. US-Dollar jährlich, betont aber das erhebliche Potenzial dieser Katalysatoren, chemische Katalysatoren zukünftig zu ersetzen.

1.3 Filter und Membranen

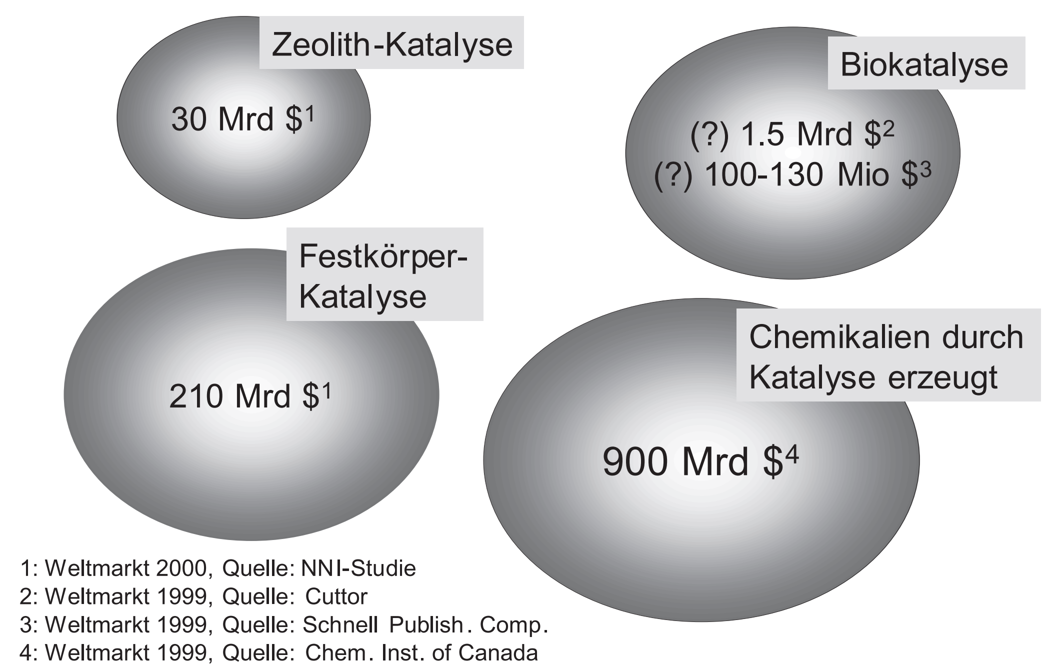
Die ausreichende Versorgung mit sauberem Wasser ist eine zentrale Herausforderung dieses Jahrhunderts. Wasser kann durch Entsalzung von Seewasser gewonnen werden. Neben der herkömmlichen energieintensiven Verdampfungstechnik können durch Nanofiltrationstechniken über Trennmembranen zukunftsweisende Verfahren eingeführt werden. BCC geben in Membrane & Separation Technology News ein Marktvolumen für Nanofiltrationstechniken im Bereich Seewasserentsalzung in Höhe von 70 Mrd. US-Dollar für die nächsten 20 Jahre an. Allein für die Herstellung vergleichsweise geringer Mengen sauberen Laborwassers, welches z. B. in der Chipherstellung gebraucht wird, beziffern BCC den Membranmarkt 1999 auf 160 Mio. US-Dollar (BBC 1999).

Der Markt für Membranen für Trenntechniken von superkritischen Fluiden, für magnetische Trennverfahren, feldinduzierte Materialseparationen oder die Zentrifugal-Chromatographie betrug laut BCC 1996 500 Mio. US-Dollar und soll bis 2006 auf 1 Mrd. US-Dollar ansteigen.

Anorganische Membranen werden in der Lebensmittel- und Umwelttechnologie eingesetzt. Ihr Anteil am Membranmarkt soll 2002 182 Mio. US-Dollar betragen haben. Trennmembranen und optimierte Ionenleiter finden z. B. in Brennstoffzellen Einsatz. BCC geben das Marktvolumen von Membranen für Brennstoffzellen im Jahr 1998 mit 355 Mio. US-Dollar an und schätzen dieses Marktvolumen auf 1,3 Mrd. US-Dollar im Jahr 2003 (Tabelle 16).

Abbildung 36

Marktpotenzial am Beispiel Katalysatoren



Quelle: VDI/FhG-INT 2002, S. 106

Tabelle 16

Marktpotenzial am Beispiel Membranen

Anwendung	Zeithorizont	Weltmarktgröße
Nanofiltrationstechniken		
– Entsalzung Meerwasser	2000 bis 2020	70 Mrd. US$
– Laborwasser	1999	160 Mio. US$
anorganische Membranen (u. a. Lebensmitteltechnologie)	2002	182 Mio. US$
Trennmembranen	1998	355 Mio. US$
(z. B. in Brennstoffzellen)	2003	1.3 Mrd. US$

Quelle: VDI/FhG-INT 2002, S. 109; nach BCC (1999)

1.4 Medizin, Bio- und Gentechnologie, Pharmazie

Experten sehen gute Chancen für deutsche Unternehmen bei der Entwicklung der Nanotechnologie in der Medizintechnik, der Bio- und Gentechnologie und in der pharmazeutischen Industrie. Der Markteintritt von Produkten der Medizintechnik und der Bio- und Gentechnologie, die auf Kenntnissen der Nanotechnologie beruhen, wird unterschiedlich eingeschätzt, von der Mehrheit der Befragten jedoch erst nach dem Jahr 2005 erwartet (Jankowski 2001).

In den USA wird Nanotechnologie stärker als strategisches Instrument betrachtet. Neue Technologien werden schnell umgesetzt und vielfach anhand der dabei gemachten Erfahrungen beurteilt. Misserfolge gelten als eine mögliche Konsequenz einer Firmengründung, mit der zu rechnen ist. Ein Konkurs wird weniger als in Deutschland als Frage persönlichen Scheiterns betrachtet, was die Risikobereitschaft junger Unternehmer stärkt (Basler & Hofmann 2002, S. 124).

Diagnostik

Noch ist der Einfluss der Nanotechnologie auf den Diagnostik- und Medizintherapiemarkt eher klein. Jedoch bestehen speziell bei Biochiptechnologien Aussichten, mittelfristig markanten Einfluss bei den Nachweismethoden zu erlangen.

Für das Jahr 2005 gehen bestimmte Prognosen davon aus, dass der gesamte Diagnostikmarkt auf ca. 40 Mrd. US-Dollar anwachsen wird (VDI/FhG-INT 2002, S. 106). Im Einzelnen sind die Marktangaben und -interpretationen in diesem Segment noch sehr unterschiedlich. Frost & Sullivan kommen beispielsweise zu folgenden Prognosen: Die Hersteller von DNA-Chips werden in den nächsten Jahren beträchtliche jährliche Zuwachsraten erleben. Wurden im Jahr 2000 auf diesem Markt 874 Mio. US-Dollar umgesetzt, so sollen es im Jahr 2004 schon 2,6 Mrd. sein (Lang 2002). Der europäische Markt für Nukleinsäure-Testverfahren erwirtschaftete im Jahr 2001 einen Umsatz von 442 Millionen US-Dollar; bis 2007 wird eine Volumenverdoppelung erwartet (Frost & Sullivan 2002b), an der Nanotechnologie einen, wenn auch noch begrenzten, Anteil haben könnte. Der US-amerikanische Markt für Analysesysteme mit hohem Durchsatz erreicht 2004 voraussichtlich einen Umsatz von 3,5 Mrd. US-Dollar. Auf der Suche nach schnellen, effizienten und Kosten sparenden Verfahren könnte insbesondere die Lab-on-a-Chip-Technologie einen bedeutenden Beitrag leisten (Frost & Sullivan 2001b, 2002c).

Der weltweite Umsatz mit Rastersondensystemen wurde für das Jahr 2001 auf 2,4 Mrd. Euro geschätzt. In der Folge des Humangenomprojekts werden die Proteomiktechnologien wahrscheinlich einen starken Aufschwung erfahren. Für das Jahr 2005 wurde von Frost & Sullivan ein Weltmarktwert von 6 Mrd. US-Dollar prognostiziert. Im Bereich Bioinformatik, wo künftig Nanoinformatik und – in begrenztem Umfang – Computer, die sich Biomoleküle zunutze machen, eine Rolle spielen könnten, soll der Markt beispielsweise in den USA bis zum Jahr 2007 mehr als 6,9 Mrd. US-Dollar betragen. Aufgrund der erheblichen Datenmengen, die in der medizinischen, pharmazeutischen und biologischen Forschung anfallen, gewinnen Bioinformatikinstrumente in den kommenden Jahren besonders stark an Bedeutung (Frost & Sullivan 2001a u. 2002a).

Arzneimittel

Der Nanotechnologie wird auch ein bedeutender Einfluss auf die Arzneimittelproduktion zugesprochen. Nach Aussage der NNI-Studie (NSTC 2000) sollen 50 % der Pharmaka-Weltproduktion in Höhe von 380 Mrd. US-Dollar von Nanotechnologie beeinflussbar sein. Dies betrifft beispielsweise die Ermöglichung der Löslichkeit bestimmter Substanzen, die Verwendung von Drug-Delivery-Systemen, um Arzneimittel zu ihrem Wirkort zu bringen, die gezielte Adressierung von Tumoren oder die Detektion von Krebszellen im frühen Stadium.

Die gesamte Palette der Drug-Delivery-Systeme wird aktuell auf ein Gesamtvolumen von ca. 20 Mrd. US-Dollar eingeschätzt, davon 51 % für die orale, 30 % für die inhalative oder nasale Verabreichung, 12 % für Wirkstoffdepots und 7 % für transdermale Systeme (Briel 2002). Ein erheblicher Teil dieses Marktes könnte künftig durch Nanoprodukte abgedeckt werden.

Nanoskalige Wirkstoffe erlauben zukünftig die Einnahme weiterer Pharmazeutika per Inhalation, ohne dass das Arzneimittel seine Wirkung verliert. SkyePharma beziffert den Marktwert von oralen, transdermalen und intradermalen Nanosuspensionen, lipidischen Nanopartikeln und festen polymeren Nanopartikeln für das Jahr 2005 auf 10 Mrd. US-Dollar (SkyePharma 2000). Arzneimittel für Diabetes steigen nach Angaben von Lehman Brothers von 3 Mrd. US-Dollar im Jahr 1998 auf ca. 20 Mrd. US-Dollar im Jahr 2006. Inhalierbare Wirkstoffe sollen dann in den USA bereits 50 % Marktanteil besitzen (Lehmann Brothers 1998).

2. Gesundheit und Umwelt

Für die Bereiche Gesundheit und Umwelt werden einerseits deutliche Entlastungseffekte durch den Einsatz von Nanotechnologien vermutet bzw. erhofft, wobei etwa auf die Entwicklung neuer Diagnose- und Therapieverfahren und auf die Möglichkeiten der Energie- und Materialeinsparung hingewiesen wird. Andererseits werden aber auch mit der Nutzung von Nanotechnologien möglicherweise verbundene negative Folgen für Gesundheit und Umwelt thematisiert; einen Schwerpunkt dieser Diskussion bildet die Frage nach den Auswirkungen einer unkontrollierten Freisetzung von Nanopartikeln.

Zum Stand der Forschung über die Gesundheits- und Umweltrelevanz der Nanotechnologien ist derzeit generell festzustellen, dass die vorliegenden Untersuchungsergebnisse hinsichtlich ihrer Belastbarkeit begrenzt und wenig abgesichert erscheinen, erhebliche Lücken aufweisen und zum Teil widersprüchlich sind. Die folgenden Ausführungen zu den positiven und möglichen negativen Folgen der

Nanotechnologien für Gesundheit und Umwelt können daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sind durchweg nur qualitativer Natur und beziehen sich vor allem auf solche Aspekte, die heute schon relevant sind oder voraussichtlich mittelfristig relevant sein werden.

2.1 Positive Folgen für Gesundheit und Umwelt

2.1.1 Gesundheit

Für die Medizin werden durch nanotechnologische Entwicklungen neue Diagnose- und Therapieverfahren erwartet (Kapitel VII). Falls die routinemäßige Beobachtung weitgehend ungestörter Prozesse im Nanomaßstab gelingt, sind erhebliche Erkenntnisfortschritte in den Biowissenschaften zu erwarten. Durch aussagekräftige Modellierungen wird das Verständnis biologischer Prozesse gefördert. Medikamente und Agrochemikalien lassen sich unter Umständen schneller und kostengünstiger als zuvor entwickeln und zur Marktreife bringen. Bereits bekannte Wirksubstanzen könnten systematisch optimiert werden, in den angewandten Biowissenschaften können vermehrt effektive und effiziente Produkte und Verfahren gestaltet werden.

Im Gegensatz zu biotechnologischen Verfahren ist Nanotechnologie nicht mit solchen gesundheitlichen Risiken wie Freisetzung schlummernder Viren, Entstehung neuartiger Infektionen, unerwünschtem Gentransfer oder genetischen Veränderungen in der Keimbahn verbunden.

Auswirkungen auf Patienten

Mithilfe nanotechnologiebasierter Diagnoseinstrumente wird es künftig voraussichtlich möglich sein, Krankheiten oder Dispositionen für Krankheiten früher als bisher zu erkennen. Damit kann einerseits die Prävention verbessert werden, andererseits steigen durch frühere und differenziertere Diagnosen in vielen Fällen die Chancen der Patienten auf eine wirksame Behandlung.

Chronisch Kranke könnten mithilfe von Nanosensoren permanent überwacht werden, ohne durch diese Überwachung in ihrer Lebensqualität eingeschränkt zu sein, und gewännen damit mehr Sicherheit und Handlungsfreiheit. Gesundheitliche Situationen, die eine Intervention erfordern, würden frühzeitig erkannt. Mithilfe von Nanosensoren kann potenziell eine große Vielfalt besonders schützenswerter Gesundheitsdaten erhoben werden. Damit stellen sich allerdings auch neue Herausforderungen an den Datenschutz (Kapitel IX.3).

Der Einsatz von Nanosensorik im menschlichen Körper würde sich auch auf das Gesundheitswesen[47] auswirken: Durch den breiten Einsatz von Nanosensoren gewinnen präventive Maßnahmen gegenüber kurativen Maßnahmen an Bedeutung. Die systematische Überwachung einer großen Anzahl von Patienten erfordert eine entsprechende Informations- und Kommunikationsinfrastruktur. Die Entwicklung der Telemedizin würde voraussichtlich gefördert werden.

Die Nanotechnologie ist konkurrierenden (klassischen) Entwicklungen im Bereich der Diagnostik möglicherweise überlegen. Beispielsweise genügen bereits sehr geringe Mengen relevanter Stoffe, um auf Chips überschaubarer Größe eine Vielzahl von Tests parallel durchzuführen. Da zudem einige Analysen auch im „Hausgebrauch“ durchführbar wären, würde damit eine Entwicklung hin zu einer individualisierten Medizin, die sich bereits heute abzeichnet, weiter gefördert.

Bei der Therapie besteht Aussicht, mithilfe der Nanotechnologie gezielte und nebenwirkungsfreie Behandlungen zu entwickeln. Für manche bisher unheilbare Krankheiten, z. B. des zentralen Nervensystems, bietet Nanotechnologie eine aussichtsreiche Perspektive auf Heilung an.

Die breite, erfolgreiche Anwendung nanopartikulärer Dosiersysteme könnte zu Fortschritten bei der medikamentösen Behandlung führen. Falls Nanotechnologie in Zukunft einen spürbaren Beitrag zur Therapie von Krebs und Infektionskrankheiten leisten sollte, wären positive Auswirkungen auf Lebensqualität und Lebenserwartung der betroffenen Patienten zu erwarten.

Durch Verfahren der Nanotechnologie kann die Biokompatibilität künstlicher Implantate verbessert werden. Zudem ist zu erwarten, dass Implantate länger im Körper funktionsfähig bleiben. Damit verringern sich die Nebenwirkungen für Patienten, Operationen, um abgenutzte Implantate zu ersetzen, werden überflüssig, die Lebensqualität der Patienten nimmt zu. Voraussichtlich lassen sich auch Kosteneinsparungen im Gesundheitswesen erzielen.

Die Steuerung biologischer Vorgänge eignet sich auch dazu, die Leistungsfähigkeit von Menschen, Tieren und Pflanzen zu steigern. Damit stellt sich – ähnlich wie in anderen Bereichen auch – die Frage, inwieweit Menschen verändernd in den menschliche Körper und andere Lebewesen eingreifen sollen und dürfen (Kapitel IX.3).

Mittelfristig werden voraussichtlich nicht nur bestehende Implantate durch verbesserte Modelle ersetzt, sondern auch neue Formen der Implantation möglich werden. Indem Nano- und Biotechnologie zusammenwirken, verwischen die Grenzen zwischen Implantation und Transplantation. Diskutiert wird beispielsweise, alternde Organe durch frische Organe zu ersetzen, die auf einer nanotechnologischen Matrix mithilfe körpereigener Stammzellen in vitro neu aufgebaut wurden. Mit solchen Verfahren ließen sich einerseits Lebensqualität und Lebenserwartung einer großen Zahl von Patienten entscheidend verbessern, andererseits würde sich die Medizin vermehrt zum Reparatur- und Wartungsbetrieb am menschlichen Körper entwickeln (Kapitel IX.3).

---

[47] Inwiefern die Kosten des breiten Einsatzes von Nanosensorik auch durch einen entsprechenden Nutzen gerechtfertigt sind, müsste noch überprüft werden. Einsparungen ließen sich wahrscheinlich durch stärkere Prävention und Früherkennung von Krankheiten erzielen. Mehrkosten können dadurch entstehen, dass vermehrt Abweichungen vom „Normalzustand“ behandelt werden, die zuvor unbemerkt und folgenlos geblieben wären.

Könnten langfristig Nanomaschinen mit genau definierten Funktionen in großen Mengen günstig hergestellt werden, so würde deren Einsatz die Lebenswissenschaften revolutionieren. Krankheiten könnten bereits in ihren Ansätzen erkannt und behandelt werden, Alters- und Verschleißerscheinungen ließen sich wesentlich besser als bisher behandeln.

Relativierend ist anzumerken, dass bisher mit wenigen Ausnahmen die positiven Auswirkungen von Nanotechnologie auf die menschliche Gesundheit hypothetisch sind. Auch bei anderen Techniken, welche die Medizin revolutionieren sollen, wie Stammzellen- und Gentherapie, hat sich gezeigt, dass in der Praxis erhebliche Hindernisse überwunden werden müssen und schnelle Erfolge nicht zu erwarten sind.

Auswirkungen auf Arbeitnehmer, Verbraucher und unbeteiligte Dritte

Falls Nanotechnologie zu einer verbesserten Lebensqualität und höheren Lebenserwartung von Patienten beiträgt, wird auch das Umfeld dieser Patienten entlastet, vor allem in der Familie und am Arbeitsplatz. Damit würde ein Beitrag geleistet, um Stress und psychosomatischen Erkrankungen vorzubeugen.

Nanoprodukte in den Bereichen Ernährung und Kosmetik sollen das Wohlbefinden der Verbraucher steigern. Damit sind sie geeignet, die Gesundheit der Konsumentinnen und Konsumenten ebenfalls zu fördern. Zugleich kann hieraus jedoch auch ein Leistungsdruck resultieren, das individuelle Aussehen und die persönliche Leistungsfähigkeit zu verbessern.

2.1.2 Umwelt

Vom Einsatz der Nanotechnologien werden deutliche Entlastungseffekte für die Umwelt erwartet, etwa durch

– Einsparung von stofflichen Ressourcen (u. a. Minimierung der Schichtdicken bei nanoskaligem Beschichtungs- und Katalysatormaterial, mit Nanopartikeln optimierte (verstärkte) Materialien im Leichtbau, verschleiß- und reibungsarme Oberflächen im Maschinenbau, hochspezifische Membranen in der Biotechnologie);

– Verringerung des Anfalls von umweltbelastenden Nebenprodukten (u. a. durch gezielte alternative Reaktionsführung in Nanoreaktoren mit Nanokatalysatoren);

– Effizienzverbesserung bei der Energieumwandlung (u. a. durch optimierte Bauteile bei Solar- und Brennstoffzellen, verlustarme Speicherung von Energie);

– Verringerung des Energieverbrauchs (u. a. durch Aufbringung geringerer Materialmengen auf Oberflächen);

– Entfernung umweltbelastender Stoffe aus der Umwelt (u. a. Entfernung von Wasserkontaminationen durch Nanofilter);

– Erhöhung der Sicherheit (u. a. durch verbesserte Sensorik bei der Werkstoffprüfung).

Einige Anwendungen der Nanotechnologie im Bereich der Lebenswissenschaften versprechen besonders günstige ökologische Eigenschaften. Beispielsweise liegt ein Vorteil der Lab-on-a-Chip-Technologie darin, dass nur geringste Mengen an Proben und Reagenzien für chemische Analysen benötigt werden. Die Systeme beanspruchen wenig Platz und verbrauchen kaum oder keine Energie im Betrieb. Darüber hinaus eignet sich die Lab-on-a-Chip-Technologie für die Analyse von Umweltschadstoffen und für Diagnosen im Bereich der Arbeits- und Umweltmedizin.

Da nanotechnologische Produkte ihre Wirkung im Organismus gezielt entfalten, werden sie in geringeren Mengen als herkömmliche Wirkstoffe produziert und eingesetzt. Die behandelten Organismen scheiden weniger (ungenutzte) bioaktive Stoffe in die Umwelt aus. Kleine, hochempfindliche Biosensoren können den Schutz der Umwelt vor schädlichen Einflüssen unterstützen.

2.2 Mögliche negative Folgen für Gesundheit und Umwelt

2.2.1 Gesundheit

Nanopartikel und Gesundheit

Nanoteilchen werden vom menschlichen Körper potenziell über die Atemluft (inhalativ), durch Verschlucken (oral) oder über die Haut (dermal) aufgenommen.

Vermutungen über mögliche negative Folgen der Inhalation von Nanopartikeln basieren bisher im Wesentlichen auf Analogieschlüssen zu Ergebnissen vorliegender Untersuchungen über die Wirkungen ultrafeiner Partikel[48]. Beispielsweise zeigen epidemiologische Untersuchungen, dass Krankheitsgrad und Sterblichkeit in der Bevölkerung mit zunehmender Luftverschmutzung ansteigen. Dieser Effekt wird wesentlich auf ultrafeine Partikel zurückgeführt, aber die Datenlage ist nur beschränkt. Weil ultrafeine Partikel von Makrophagen, d. h. Zellen der unspezifischen Immunabwehr, weniger gut aufgenommen und verarbeitet werden können, lagern sie sich im Interstitium des Lungengewebes ab. Ultrafeine Partikel sind besonders in der Lage, eine Entzündungsreaktion auszulösen. Auf diese Weise können sich chronische Erkrankungen, wie z. B. Asthma, plötzlich verschlimmern. Es existieren auch Hinweise, dass höhere Dosen von Parti-

[48] Feine und ultrafeine Partikel werden seit langem aus toxikologischer Sicht in bestimmte Größenordnungen unterteilt: PM_{10}, inhalierbarer Schwebstaub < 10 µm; $PM_{2,5}$, lungengängiger Schwebstaub < 2,5 µm; $PM_{0,1}$, ultrafeine Partikel < 100 nm. Der Begriff „Nanopartikel“ findet mittlerweile auch Eingang in die Toxikologie, wo er derzeit offenbar mit dem Begriff „ultrafeine Partikel“ ($PM_{0,1}$) in etwa gleichgesetzt wird. Eine genau definierte Abgrenzung zwischen Nanopartikeln und ultrafeinen Partikeln hinsichtlich ihrer Größe existiert nicht. Eine Unterscheidung könnte eher dahin gehend gemacht werden, dass Nanomaterialien als bewusst hergestellte Produkte im Nanometerbereich – die gezielt neue Eigenschaften aufweisen – anzusehen sind, ultrafeine Partikel dagegen eher unbeabsichtigt bei Verbrennungsprozessen oder auf mechanischem Wege entstehen.

keln Lungenkrebs verursachen können (Abbey et al. 1999; Pope et al. 2002).

Zudem kommt es bei Menschen, die an Arteriosklerose und Herzerkrankungen leiden, durch Inhalation ultrafeiner Partikel zu einer Verschlimmerung der bestehenden Erkrankung und dadurch bedingten Todesfällen. Der Mechanismus dieser Wirkung ist bisher noch nicht schlüssig geklärt. Vermutet werden einerseits direkte Effekte von ultrafeinen Partikeln, die über die Lunge in den Blutkreislauf gelangen und dort mit Rezeptoren interagieren. Andererseits werden aber auch indirekte Auswirkungen diskutiert, die auf die Freisetzung vasoaktiver (den Gefäßtonus beeinflussender) Botenstoffe, wie z. B. Endotheline oder Fibronektin, zurückgehen (Borm 2002a).

Daneben können ultrafeine Partikel nachweislich chemische Reaktionen im Körper katalysieren, Proteinmoleküle anlagern und transportieren sowie Kalziumkanäle in Zellmembranen öffnen. Weitere Wechselwirkungen, etwa mit der Replikation und Reparatur von DNA, werden vermutet (Borm 2002a).

Ultrafeine Partikel werden sehr leicht durch unspezifische Interaktion mit der Zellmembran in Zellen aufgenommen. Werden sie von Makrophagen inkorporiert, lösen sie Reaktionen des Immunsystems aus. Werden sie von beliebigen Zellen aufgenommen, stellt sich die Frage, wie sich die Partikel innerhalb der Zelle verhalten, was mit ihren Überresten und Abbauprodukten geschieht und ob sie beispielsweise in der Lage sind, Proteine aus dem Zellinneren an sich zu binden. In einem In-vitro-System wurde festgestellt, dass ultrafeine Titandioxidpartikel, und zwar wesentlich mehr als größere TiO_2-Teilchen, das Enzym Myeloperoxidase adsorbieren (Borm 2002b).

In vielen Anwendungsbereichen der Nanotechnologie treten Nanotubes[49] auf, die als lungengängige Fasern möglicherweise ähnliche gesundheitliche Folgen nach sich ziehen könnten wie Asbestfasern, wobei zu beachten ist, dass letztere um einiges größer sind (µm-Bereich) als Nanotubes. Asbestfasern verursachen aufgrund ihrer Lungengängigkeit nach einer Latenzzeit von 20 bis 40 Jahren bei einem Teil der Exponierten Asbestose, Lungenkrebs oder bösartige Tumore des Brust- und Bauchfells (Mossman et al. 1990; Suva 1998).

Nanopartikel können, wie schon erwähnt, Zellmembranen verhältnismäßig leicht durchdringen. Im Experiment wurde beispielsweise gezeigt, dass bestimmte Nanopartikel gut geeignet sind, Proteine über die Nasenschleimhaut in das Blut oder das lymphatische System zu transportieren. Durch Verabreichung in Form von Nanoemulsionen ließ sich die Wirksamkeit entzündungshemmender Medikamente und von Lokalanästhetika steigern (Jansen/Maibach 2001). Ähnliche Effekte können auch zum unerwünschten Transport von Wirkstoffen über biologische Barrieren führen.

[49] Derzeit wird z. B. die Verwendung von Nanoröhrchen als fluoreszierendes Kontrastmittel in der Medizin diskutiert (Joslin 2002).

Über Lebensmittel und Kosmetika kommt der menschliche Körper bereits heute vielfach mit Nanopartikeln in Kontakt, die z. B. als Farbstoffe oder UV-Filter eingesetzt werden. An die Marktzulassung für Kosmetika werden geringere Anforderungen als an die Zulassung von Medikamenten gestellt. Gesundheitliche Auswirkungen werden sich möglicherweise erst längerfristig bei den Verbraucherinnen und Verbrauchern zeigen. Kosmetika, die pharmakologische Wirkstoffe enthalten, unterstehen heute teilweise der Gesetzgebung für Arzneimittel. Die Grenzen zwischen Medikamenten und Kosmetika werden zunehmend unscharf. Fortschritte in der Kosmetik verändern die gesellschaftlichen Ansprüche an das Erscheinungsbild und die körperliche „Perfektion" von Menschen weiter, was allerdings nicht nanospezifisch ist.

Eine sehr kritische Position zu den möglichen negativen Auswirkungen der Freisetzung von Nanopartikeln wird besonders von der etc group (action group on erosion, technology and concentration) vertreten (etc group 2003a u. b), zum Teil aber auch in einer von Greenpeace Environmental Trust veröffentlichten Studie (Arnall 2003).

Auswirkungen auf Patienten

Aufgrund der hohen Wirksamkeit, die etwa durch gezieltes Drug Targeting möglich ist, könnte die Gefahr der Überdosierung von Medikamenten zunehmen. Andererseits wird es Drug Targeting aber auch erlauben, die verabreichten Wirkstoffmengen zu verringern und damit Nebenwirkungen zu reduzieren.

Zur Vermeidung von unerwünschten Nebenwirkungen von Behandlungen sollten bei medizinischen Anwendungen der Nanotechnologie sämtliche Wirkmechanismen und Effekte, die durch eine Überdosierung von Medikamenten oder aufgrund toxischer Stoffeigenschaften eintreten können, berücksichtigt werden (analog zur klassischen Medizin). Dazu gehören Untersuchungen zu möglichen Folgewirkungen von schwermetallhaltigen Nanoprodukten (z. B. mutagene und kanzerogene Effekte), zu allergischen Reaktionen, zu Folgen für das ungeborene Kind, zu Auswirkungen auf das Immunsystem und auf besonders sensible Patientengruppen, zum Einfluss möglicher Verunreinigungen, zu Interaktionen mit Nahrungsbestandteilen und anderen Medikamenten.

Die durch Anwendung von Nanoprodukten spezifisch aufgeworfenen Fragen betreffen z. B. die Reaktion von Körperzellen auf eindringende Nanopartikel und deren Bestandteile, die sich im Zellinneren ansammeln können, die Überwindung der Blut-Hirn-, Blut-Liquor- oder Blut-Plazenta-Schranke oder die Art und Weise, wie der menschliche Körper diese Produkte zu erkennen und auszuscheiden vermag. Die Pharmakokinetik[50] von Wirkstoffen, die mit Nanopartikeln verabreicht werden, ist heute erst ansatzweise bekannt.

[50] Pharmakokinetik: Quantitative Untersuchung der Aufnahme, Verteilung, Verstoffwechselung und Ausscheidung von Medikamenten im Organismus.

Denkbar ist zudem, dass sich der Umgang mit Arzneimitteln aufgrund neuer Verabreichungsmöglichkeiten verändert. So könnte z. B. die Hemmschwelle geringer sein, ein Schmerzmittel, das Nanopartikel enthält, auf die Haut aufzustreichen, als eine Kopfschmerztablette zu schlucken – insbesondere, wenn geschicktes Marketing den sanften, harmlosen Wellnesscharakter der schmerzlösenden Salbe betont. Falls sich schmerzhafte, unangenehme Injektionen durch Nanodosiersysteme ersetzen ließen, würden zudem wahrscheinlich mehr Patienten als zuvor geneigt sein, einer entsprechenden Behandlung zuzustimmen, auch wenn diese Behandlung nicht unbedingt dringend und erforderlich sein sollte.

Die pharmazeutische Industrie ist an Transportsystemen interessiert, die es erlauben, insbesondere Proteine oral zu verabreichen, um eine systemische Wirkung zu erzielen. Daher wird an der Aufnahme von Nanopartikeln über die Darmwand geforscht. Offenbar sind die körperlichen Abwehrmechanismen nur schwer zu überwinden, sodass die Gefahr einer unbeabsichtigten Aufnahme von Wirkstoffen durch Nanopartikel über das Verdauungssystem dadurch relativiert wird. Bei inhalativer Einwirkung von Nanopartikeln, die mit Wirkstoffen beladen sind, ist schwer abzusehen, wie der menschliche Körper reagiert, da er nicht darauf eingerichtet ist, Proteine über die Atemwege und die Lunge aufzunehmen. Allgemein besteht zu den biologischen Auswirkungen von Nanopartikeln noch eine Reihe offener Fragen.

Durch Verabreichung oder Implantation von Nanoprodukten können sich körperliche Eigenschaften der Patienten ändern. Magnetische Nanopartikel etwa, die vom Körper nicht ausgeschieden werden, führen zu einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber Magnetfeldern. Nanoimplantate lassen sich potenziell über größere Distanzen hinweg ansteuern. Die Anfälligkeit der Patienten gegenüber Einwirkungen von außen steigt an. Neben unbeabsichtigten Schädigungen ist daher auch Missbrauch möglich (Kapitel IX.3). Wäre etwa ein großer Anteil der Bevölkerung mit Nanosensoren und -dosiersystemen versorgt, könnten Einwirkungen auf diese Systeme auch für militärische Anwendungen Interesse gewinnen.

Auswirkungen auf Arbeitnehmer, Verbraucher und unbeteiligte Dritte

Mitarbeitende von Firmen, die Produkte im Nanometerbereich in der Gasphase herstellen oder als Pulver verwenden, sind potenziell gefährdet, Nanopartikel und -fasern einzuatmen. Schwerer kontrollierbar als die Herstellung von Nanoprodukten ist deren Ge- und Verbrauch. Nanopartikel und -fasern können auch bei der Abnutzung der Produkte oder deren Zerkleinerung zur Entsorgung freigesetzt werden. Hanselmann/Schirra (2002) gehen allerdings davon aus, das die Mengen, die beim Gebrauch aus nanotechnologischen Beschichtungen freigesetzt werden, gering sind und vermutlich nicht ausreichen, um gesundheitliche Folgen hervorzurufen.

Produkte, die Wohlbefinden, Aussehen und Leistungsfähigkeit verbessern, laden zum Missbrauch ein. Viele Verbraucherinnen und Verbraucher werden zugunsten einer kurzfristigen Wirkung Langzeitrisiken in Kauf nehmen, wie dies heute z. B. schon beim Konsum von Tabak, Alkohol und Partydrogen zu beobachten ist.

Nanotechnologische Anwendungen, welche die Zusammensetzung und Beschaffenheit von Lebensmitteln beeinflussen, könnten mit gesundheitlichen Risiken für die Verbraucherinnen und Verbraucher verbunden sein. Wenn die natürliche Konsistenz der Nahrungsmittel verändert wird, sind die Konsumenten kaum noch in der Lage, die Produkte mithilfe ihrer Sinne und Erfahrung angemessen zu bewerten.

2.2.2 Umwelt

Künstliche Nanostrukturen können z. B. durch Emissionen der Nanoindustrie oder durch Entstehung von Nanopartikeln beim alltäglichen Gebrauch von Nanoprodukten in die Umwelt gelangen. Ihr Ausbreitungsverhalten und ihre Auswirkungen auf die Umwelt, insbesondere potenzielle Langzeitfolgen, sind bisher kaum bekannt.

- Aufgrund ihrer geringen Masse und Größe können Nanopartikel bei einer Freisetzung in die Umwelt vor allem auf dem Luftweg über weite Strecken transportiert und diffus verteilt werden. Kontaminationen mit Nanopartikeln werden in der Regel schwer zu lokalisieren und zu beheben sein.
- Zudem ist insbesondere auf solche Stoffe zu verweisen, die in der natürlichen Umwelt nicht vorkommen, wie Fullerene oder Nanotubes, die als neuartige Materialien einzustufen sind.
- Offen ist derzeit auch, inwieweit beispielsweise eine Wiederverwertung nanotechnologiebasierter (Massen-)Produkte (z. B. Anfall größerer Mengen an Einwegchips bei Labs-on-a-Chip-Systemen) ökonomisch und ökologisch attraktiv erfolgen könnte.

Im Hinblick auf die potenzielle Ausbreitung nanoskalierten Materials sind Aspekte wie Mobilität, Reaktionsfreudigkeit, Persistenz, Lungengängigkeit, Wasserlöslichkeit etc. zu berücksichtigen. Einer unkontrollierten Ausbreitung kann durch Maßnahmen vorgebeugt werden, die auf schnelle Metabolisierung von Stoffen (biologische bzw. photochemische Abbaubarkeit), geringe Bioverfügbarkeit und Bioakkumulation sowie auf die Vermeidung „offener Anwendungen“ (gutes Containment) zielen.

Zudem sind unterschiedliche Wirkungen auf die jeweiligen Umweltmedien zu erwarten. In der Luftreinhaltung stützt man sich derzeit auf Aussagen zu ultrafeinen Partikeln, die aus Emissionen des Verkehrs stammen. Ob diese Aussagen auf Emissionen aus der Produktion von Nanopartikeln bzw. deren Freisetzung durch den Gebrauch entsprechender Produkte übertragbar sind, ist offen. Durch technische Verbesserungen im Verkehr wurden bisher lediglich gröbere Staubfraktionen ($> PM_{10}$) effizient reduziert. Im Gegensatz dazu hat die Konzentration ultrafeiner Partikel ($PM_{0,1}$) in der Atemluft sogar eher zugenommen (Eickmann/Seitz 2002).

In Bezug auf Wasser wird von einer hohen Beweglichkeit der Nanopartikel ausgegangen. Abwässer aus Bergwer-

ken beispielsweise enthalten eine vergleichsweise hohe Konzentration an Schwermetallen; Nanopartikel könnten diese Schwermetalle in Fließgewässer verschleppen (Vista Verde 2002).

Darüber hinaus kann auch die Herstellung von Nanostrukturen negative Umweltwirkungen verursachen. Zu nennen sind hier insbesondere der Energiebedarf und der Rohstoffverbrauch. Beim Top-down-Ansatz ist zur Herstellung von Nanostrukturen ein erheblicher Einsatz dieser Ressourcen erforderlich, dies ist z. B. in der Elektronikindustrie wohlbekannt und gut belegt. Aber auch mit dem Bottom-up-Ansatz können beispielsweise durch definiert geführte Reaktionswege und hierfür verwendete Spezialchemikalien und Spezialanlagen nicht zu unterschätzende Umweltwirkungen verbunden sein.

2.3 Ausgewählte Fallbeispiele

Das Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) hat exemplarisch ökologische Aspekte zweier Anwendungsfelder der Nanotechnologie untersucht: die Photovoltaik und den Autoabgaskatalysator. Die durchgeführten ökologischen Profilbetrachtungen orientieren sich an der Methode der Ökobilanz nach DIN ISO 14040, können aber wegen der unzulänglichen Datenbasis nicht alle Anforderungen erfüllen. Die Ergebnisse der Fallstudien werden im Folgenden kurz zusammengefasst (IÖW 2002).

2.3.1 Photovoltaik

Die Photovoltaik wurde ausgewählt, weil gerade in diesem Bereich in der Mittel- bzw. Langzeitperspektive erhebliche Hoffungen auf ökologische Entlastungspotenziale durch den Einsatz von Nanotechnologie bestehen. Aufgrund des derzeitigen Forschungsstandes, des Innovationsgrades und der Datenverfügbarkeit wurde auf die Farbstoffsolarzelle bzw. die daraus hergestellten Module fokussiert.

Auf der Basis einzelner Studien zu Farbstoffsolarzellen wurde ein abschätzender, auf einzelne Indikatoren gerichteter ökobilanzieller Vergleich mit einem klassischen, siliziumbasierten Modul durchgeführt. Als Standard-Vergleichsmodul (Status Quo) wurde u. a. aufgrund der höchsten Marktrelevanz ein Solarmodul auf der Basis von multikristallinem Silizium gewählt.

Eine grundsätzliche Schwierigkeit für den Vergleich der beiden Konzepte einer Farbstoffsolarzelle und einer auf multikristallinem Silizium basierenden (Halbleiter-)Solarzelle liegt darin, dass die Materialien und Wirkungsweisen völlig unterschiedlich sind. Insofern können quantitative Vergleiche nicht über Aspekte wie Material- oder Emissionsreduktionen gezogen werden. Dies gilt umso mehr, als zum gegenwärtigen Zeitpunkt mangels ausreichender Daten noch keine aggregierten Wirkungsindikatoren aus allen relevanten Umwelteinflüssen gebildet werden können. Möglich waren Aussagen zur Energiebilanz, zur Ressourcenfrage und zu Toxizitäten bei einigen kritischen Stoffen. Aussagen über Emissionen konnten aufgrund der Datenqualität nur in sehr begrenztem Umfang gemacht werden.

Die Farbstoffsolarzelle besteht im Wesentlichen aus einer nanokristallinen Titandioxid-Elektrode mit einem organometallischen Farbstoff, an dem die primäre Lichtenergiekonversion stattfindet. Des Weiteren wird ein Elektrolyt benötigt, derzeit noch eine Iodid-Lösung, in der als Lösungsmittel verschiedene Nitrile eingesetzt werden. Als Gegenelektrode kommen kohlenstoffbasierte Schichten, aber auch Platin zum Einsatz.

Die möglichen materialbezogenen Optionen zeigen, dass hier eine abschließende ökologische Bewertung noch nicht möglich ist. Auf der Basis eines definierten Zelltyps, der auf dem gegenwärtigen Forschungsstand basiert, kann zur Umweltrelevanz der Zelle aber Folgendes festgestellt werden:

– Beim eingesetzten Farbstoff handelt es sich überwiegend um rutheniumbasierte Komplexe. Ruthenium fällt als Nebenprodukt bei der Platingewinnung an und wird auch bei einem größeren Verbrauch (z. B. einem Anteil von 5 % an der Weltstromerzeugung durch derartige PV-Module) nicht knapp. Zudem ist Ruthenium nach derzeitigen Forschungen nicht als toxisch einzustufen. Problematisch sind hingegen die als Lösungsmittel eingesetzten Nitrile, die jedoch wahrscheinlich auch ersetzbar sind.

– Für die Energiebilanz eines Farbstoffmoduls wurde für den Fall eines zeitnahen Markttauftritts 7 % Wirkungsgrad bei zehn Jahren (stabiler) Lebensdauer angenommen. Für ein Fortschritts- bzw. Trendszenario wurde von 9 % und 15 Jahren ausgegangen[51]. Im Ergebnis wurde gezeigt, dass das Farbstoffmodul trotz deutlich geringerer Erträge eine niedrigere energetische Amortisationszeit aufweist: Für den „zeitnahen“ Status-quo-Fall wurde eine Spanne von 0,4 bis 1 (Silizium 1,9), für das Zukunftsszenario von 0,2 bis 0,6 (Silizium 0,7) Jahren errechnet.

– Neben dem Vergleich der ökologischen Eigenschaften mit herkömmlichen Silizium-Solarzellen ist auch ein Vergleich der Farbstoffzelle mit anderen Dünnschichtsolarzellen von Interesse. Cadmium-Tellurid (CdTe)- und Kupfer-Indium-Selenid ($CuInSe_2$)-Zellen enthalten höhere Mengen an Schwermetallen als die Farbstoffzelle. Vor allem Cadmium ist toxikologisch nicht unbedenklich. Daneben können bei einem Einsatz in großem Maßstab Ressourcenprobleme auftreten, da insbesondere Tellur, Indium und Selen nicht unbegrenzt verfügbar sind. Verglichen damit treten bei Dünnschichtzellen aus amorphem bzw. nanokristallinem Silizium keine Ressourcenprobleme auf, allerdings liegt ihr Wirkungsgrad unter dem von CdTe und $CuInSe_2$.

Die Untersuchung hat – mit dem Fokus auf die Farbstoffzelle – gezeigt, dass mit dem Einsatz neuer nanotechnologischer Verfahren und neuer Materialien ökologische

[51] Demgegenüber erreichen die multikristallinen Siliziummodule heutzutage durchschnittlich 13 % Wirkungsgrad und 20 Jahre Lebensdauer; als Trend wurden in der Fallstudie 16 % und 25 Jahre angesetzt (IÖW 2002).

Vorteile hinsichtlich der Umweltwirkungen und Energiebilanz im Vergleich zu klassischen PV-Modulen erzielt werden können. Dies gilt allerdings auch für die nanotechnologische Weiterentwicklung der konventionellen Halbleitertechnologien, die durch Überschreitung der physikalischen Grenzen durch Nano- und Sub-Nanoeffekte ebenfalls effizienter werden können (Zellen der dritten Generation). Die Untersuchung weist insofern eine positive ökologische Indikation für die fokussierten nanobasierten Technologien auf. Für eine abschließende Bewertung der verschiedenen technologischen Entwicklungen ist es jedoch zu früh.

2.3.2 Autoabgaskatalysatoren

Im Fall des Autoabgaskatalysators können die Auswirkungen der Nanoskaligkeit von Einsatzstoffen in ihrer Entwicklung schon über einen längeren Zeitraum analysiert werden. In der Fallstudie wird der Fokus auf das Anwendungsfeld des Drei-Wege-Katalysators eingeschränkt. Untersucht wurden fünf Varianten, die einerseits die Entwicklung der Katalysatorentechnologie nachzeichnen und andererseits die aktuellen Neuentwicklungen berücksichtigen. Mit Bezug zu diesen Entwicklungen wurden die damit in Verbindung stehenden ökologischen Effekte untersucht. Wichtige Ergebnisse sind:

- Auch unter Berücksichtigung der Lücken bei den vorhandenen Informationen zu Stoff- und Energieströmen in einzelnen Phasen des Produktlebensweges können an diesem Anwendungsbeispiel quantifizierte ökologische Entlastungseffekte festgestellt werden.
- Der Trend hin zum Einsatz immer kleinerer und homogenerer nanoskaliger Edelmetallpartikel bewirkt eine erhöhte katalytische Wirkung der Platin-Gruppen-Metall-(PGM)-Partikel. Dies sowie die Fähigkeit, diese Partikel immer besser im Autoabgaskatalysator thermostabil zu binden und Alterungsprozesse zu vermindern, führt einerseits zur Verminderung der notwendigen PGM-Einsatzmenge sowie andererseits zur Fähigkeit, die sich verschärfenden Grenzwerte der international geltenden Abgasnormen zu erfüllen.
- Ökologische Entlastungseffekte werden also einerseits dadurch erzielt, dass die Schadstoffemissionen der Autoabgase verringert werden, und andererseits dadurch, dass durch die „ersparte“ Rohstoffgewinnung von PGM deren hohe Umweltauswirkungen vermieden werden.
- Die realisierbaren Entlastungspotenziale bewegen sich je nach betrachteter Emissionsart im Bereich zwischen 10 bis 40 %. Eine Erhöhung der Recyclingquote würde zusätzlich entlastend wirken.
- Die Verminderung der notwendigen PGM-Einsatzmenge hat außerdem unter ökonomischen Gesichtspunkten eine hohe Bedeutung, da der Preis des Autokatalysators wesentlich vom Preis der eingesetzten PGM mitbestimmt wird.
- Neben der grundsätzlichen Beurteilung von Gefährdungspotenzialen durch PGM-Emissionen bleibt die Frage einer zusätzlichen kombinierten Wirkung aufgrund der immer geringer werdenden nanoskaligen Partikelgröße in allen bisherigen Studien eher offen. Aussagekräftige Untersuchungen hierzu konnten nicht gefunden werden.

3. Ethische und gesellschaftliche Aspekte

Bei technischen Neuentwicklungen lasse sich immer wieder beobachten, dass der technisch-wissenschaftliche Fortschritt „faits accomplis“ schaffe, die normativ nicht mehr einzuholen sind, schreibt der Philosoph und Soziologe Jürgen Habermas in seinem Buch „Die Zukunft der menschlichen Natur“ (2001). Habermas führt aus, dass Fragen, mit denen künftige technische Entwicklungen die Gesellschaft möglicherweise konfrontieren könnten, zeitig unter normativen Gesichtspunkten zu beurteilen seien, „auch wenn Experten versichern, dass sie heute ganz außer Reichweite liegen“ (Habermas 2001). Andere Autoren halten diesen Argumenten entgegen, es sei sinnvoller, die Probleme der Zukunft mit dem Wissen der Zukunft als mit den Kenntnissen der Gegenwart zu bewältigen (Myhrvold 2000).

Zu den ethischen und gesellschaftspolitischen Fragen, die durch die Entwicklung der Nanotechnologie aufgeworfen werden, gehören u. a. die Probleme der Verteilungsgerechtigkeit, des Schutzes der Privatsphäre, der öffentlichen und nationalen Sicherheit sowie der Veränderung des Verhältnisses von Mensch und Maschine (Mnyusiwalla et al. 2003). Trotz der forschungspolitischen Einigkeit in Nordamerika, Europa und anderen Regionen darüber, dass Fragen dieser Art wissenschaftlich untersucht werden müssen, hat sich der neue Forschungsbereich anscheinend eher schleppend entwickelt (Mnyusiwalla et al. 2003).

In der praktischen Philosophie und Ethik wurde der Themenbereich Nanotechnologie bisher kaum thematisiert. Es existieren jedoch aus verwandten technologischen Bereichen (Bio- und Gentechnologien, Neurologie, Informationstechnologie etc.) – oder auf sie bezogen – Beiträge zur Fragestellung, wie weit Menschen bzw. das menschliche Leben technisiert werden können, bevor es zu gravierenden Identitätsveränderungen bzw. zum Identitätsverlust kommt. Zudem tauchen in Visionen zur Nanotechnologie immer wieder Aspekte auf, die den Unterschied bzw. die Grenze zwischen dem, was Menschen sind, und dem, was sie, so wie sie sind, mithilfe technischer Errungenschaften und Anwendungen erschaffen, verwischen bzw. verschieben. Solche Aspekte betreffen die Durchdringung und Veränderung des menschlichen Körpers durch Nanotechnologie, also z. B. Versuche, seine biologischen Bestandteile durch technische zu ergänzen bzw. zu ersetzen und ihn mit externen Maschinen oder anderen Körpern bzw. Körperteilen zu vernetzen. Derartige Vorstellungen, aber auch weitere Visionen zur Nanotechnologie ähneln Visionen zu anderen neuen Technologieentwicklungen oder beziehen sich sogar direkt auf diese. Dies gilt z. B. für die Vorstellung eines universellen Anwendungsspektrums, für Hoffnungen auf eine erhebliche Verlängerung menschlicher Lebenserwar-

tung und auf technische Erweiterungen individueller Existenz sowie für Schreckensvisionen von unkontrollierbaren zerstörerischen Folgen technologischer Entwicklung (vgl. Basler & Hofmann 2002, S. 85 u. Kapitel VIII.1).

Durch solche und andere Anwendungsszenarien werden z. T. tief greifende ethische und gesellschaftliche Fragen aufgeworfen, die im Rahmen des vorliegenden Berichts nicht erschöpfend behandelt werden können. Einige wichtige Aspekte sollen jedoch an dieser Stelle beispielhaft beleuchtet werden.

3.1 Eingriffe in den menschlichen Körper

Im Folgenden wird am Beispiel des Verhältnisses von Mensch und Maschine auf einige Visionen zur Nanotechnologie näher eingegangen. Schwerpunkt der Diskussion hierzu sind ethisch und gesellschaftlich relevante Aspekte zu nanotechnologischen Anwendungen in den Lebenswissenschaften, insbesondere im Bereich Medizin/Gesundheit – und zwar deshalb, weil hier aus ethischer Sicht durch die (Weiter-)Entwicklung der Nanotechnologie für den Menschen am direktesten und intensivsten Fragen zum eigenen Selbstverständnis aufgeworfen werden und Folgen mit großer Eingriffstiefe zu diskutieren sind. Eine umfassende Erörterung und Einschätzung des Realitätsgehaltes der verschiedenen Visionen und der mit ihnen möglicherweise verbundenen ethischen Probleme, Fragen und Konsequenzen kann dabei nicht geleistet werden. Es wird vielmehr angestrebt, einige Voraussetzungen und ethische Implikationen sowohl der realistisch als auch der utopisch anmutenden Visionen herauszuarbeiten und die jeweiligen Diskussionen zu ihnen zu skizzieren. Ziel der folgenden Ausführungen ist es mithin, einige der (in Kapitel VIII vorgestellten) Visionen versuchsweise kritisch zu hinterfragen und zudem auf ihren ideengeschichtlichen Hintergrund einzugehen.

Zugrunde liegt dabei die Feststellung, dass visionäre und ethische Diskurse über Nanotechnologie nicht nur vielfältige Verbindungen mit Diskursen über andere Technologien aufweisen, sondern zudem auf einer langen Tradition technologiebezogener Visionen aufsetzen. Diese Feststellung gilt einerseits hinsichtlich technologiebezogener Hoffnungen der Vergangenheit: „The nano endeavor is in profound ways culturally embedded and relevant. It is spirited by the grandiose idea of man becoming as briliant as nature in building things (materials, devices, artifacts, products), a truly utopian idea with a longstanding tradition of man's fascination over the prospects of science and technology“ (Glimell 2001, S. 159). Andererseits haben auch die Schreckensvisionen zukünftiger nanotechnologischer Entwicklungen historische Vorläufer.

Mit der Nanotechnologie und den Lebenswissenschaften beispielsweise treffen zwei ausgedehnte Forschungsfelder aufeinander, die sich beide zurzeit in einer intensiven Entwicklung befinden. Spezifisch für bestimmte Langfrist-Visionen zu Nanotechnologie in diesem Bereich ist die Hoffnung, die Art und Weise bisheriger (unzulänglicher) menschlicher Existenz könne mithilfe verschiedener Technologien überwunden oder sogar durch neuartige Lebensformen ersetzt werden.

Visionen zur Nanotechnologie und das Verhältnis von Natur und Technik

Aktuelle Langfrist-Visionen zum Einsatz der Nanotechnologie im Bereich der Lebenswissenschaften stehen in einer langen Tradition der gesellschaftlichen Auseinandersetzung mit dem Verhältnis von Natur und Technik, von Mensch und Maschine. In der griechischen Antike entstand die Legende von Prometheus, der den Menschen aus Erde formt und ihm das Feuer bringt. In Mittelalter und Renaissance streben Alchemisten nach der Erzeugung von Homunculi, menschenähnlichen Lebewesen, die außerhalb des Mutterleibs hergestellt werden können. In der jüdischen Mythologie erscheinen die Golems, unförmige seelenlose Wesen, die aus Lehm geformt sind und ihren menschlichen Schöpfern oft als Diener zur Seite stehen. 1816 verfasst Mary Shelley den Roman „Frankenstein“, in dem Viktor Frankenstein aus Körperteilen Verstorbener ein künstliches Wesen schafft. In neuerer Zeit treten künstliche menschenähnliche Geschöpfe häufig als Roboter auf. In Filmen wie „Blade Runner“ und „Terminator“ sind sie mit Eigenschaften ausgestattet, die sie den Menschen überlegen machen (Borrmann 2001). Diese Mischwesen aus Mensch und Maschine werden als „Cyborgs“ bezeichnet. Der Begriff wurde 1960 von M. E. Clynes und N. S. Kline gebildet, die in den Neurowissenschaften bzw. in der klinischen Psychiatrie tätig waren. Ursprünglich war die Konstruktion von Cyborgs als eine befreiende Technologie gedacht, die es Menschen erlauben sollte, mit ihrem Einsatz und ihrer Hilfe von der Natur gesetzte Grenzen zu überschreiten, z. B. im Bereich der Raumfahrt (Baumeler 2002).

In den Diskussionen über mögliche Prozesse technologiebedingter Dehumanisierung spielt die Hoffnung, kolonisatorisch ins Weltall vorzustoßen, schon seit langem eine zentrale Rolle. Der Physiker John Desmond Bernal prognostizierte bereits in den 20er-Jahren des 20. Jahrhunderts eine Revolution der Materialwissenschaft, ein höheres Zivilisationsniveau und die Emanzipation des intelligenten Lebens von der Oberfläche des Globus mithilfe der Raumfahrt (Schäfer 1994, S. 53 ff.). Zudem verlieh er – ebenfalls in seinem Werk „The World, the Flesh and the Devil“ (1929) – der Hoffnung Ausdruck, dass der menschliche Körper in der Zukunft mit technologischen Mitteln stark verändert werden könne. Bestimmte Gruppen der Menschheit (und insbesondere Wissenschaftler) würden dabei wahrscheinlich als eine Avantgarde der Dehumanisierung vorangehen, viele Menschen sich aber weder an der Auswanderung in den Weltraum noch an der technologischen Transformation des menschlichen Körpers beteiligen. Ähnliche Überlegungen wurden später z. B. auch von dem Physiker Freeman Dyson angestellt, der Überlegungen zur Weltraumbesiedlung mit der Vision einer Aufspaltung der Menschheit in eine Vielzahl von Gattungen verknüpfte (Schäfer 1994, S. 89 ff.).

Andererseits stößt man in den Geistes- und Sozialwissenschaften häufiger auf Skepsis gegenüber Dehumanisierungsprozessen durch den technologischen Fortschritt, so

z. B. bei Jürgen Habermas, Hans Jonas und Max Horkheimer (Schäfer 1994, S. 53 ff.).

Hinter den Überlegungen zu künstlichen Menschen und Mensch/Maschine-Mischwesen steht auch die Auseinandersetzung mit dem Verhältnis von Natur und Kultur. Wurde die Natur von Menschen lange als gefährlich wahrgenommen, so erscheint sie heute als selbst gefährdet. Risiken für den Menschen gehen eher vom Menschen selbst als von der Natur aus. Menschen sind Teil der Natur, besitzen aber zugleich die Fähigkeit, Natur zu verändern, ihre Umwelt und sich selbst zu gestalten. Diese Fähigkeit impliziert die Frage, wie weit menschliche Eingriffe in die Natur gehen dürfen.

Die Antwort hängt wesentlich davon ab, ob Natur stärker als gegeben oder als formbar, als unveränderlicher Wert oder als gestaltbar verstanden wird. Die Auswirkungen solcher unterschiedlicher Einstellungen zeigen sich besonders deutlich bei technischen Eingriffen des Menschen in das menschliche Leben. Wie weit können Menschen dabei gehen, bevor sie ihre eigene Identität gefährden? Wann beginnen sich die von Menschen eingeleiteten Entwicklungen zu verselbstständigen, lassen sich nicht mehr beherrschen?

Während der Mensch immer künstlicher wird, profitiert die Technik von Vorbildern der Natur, deren Prozesse sie beeinflusst. Mensch und Maschine nähern sich also einander an. Die Schnittstelle zwischen menschlichem Körper und Außenwelt verliert dabei an Bedeutung. Einerseits passen sich Maschinen außerhalb des menschlichen Körpers immer perfekter dessen Bedürfnissen, der menschlichen Wahrnehmung an. Mithilfe computergesteuerter Geräte wird beispielsweise ein Lebensumfeld geschaffen, das den individuellen Gewohnheiten seiner Benutzer gerecht wird, lästige Aspekte der Wirklichkeit ausblenden und erwünschte Realitäten vortäuschen kann. Andererseits sind künstliche Implantate teilweise von außen steuer- und beeinflussbar. Damit zeigt sich erneut ein Spannungsfeld, das von verschiedenen neueren biomedizinischen Techniken her bekannt ist: Der Mensch ist – durch Erziehung, Zeitumstände, gesellschaftliches Umfeld etc. – immer das Produkt anderer Menschen. Zugleich besitzt er jedoch auch ein Recht auf Freiheit, ein Recht darauf, nicht Produkt anderer Menschen zu sein.

Visionen in der Kritik

Kritik an Visionen (explizit im Bereich Nanotechnologie und Lebenswissenschaften) wird u. a. hinsichtlich folgender Punkte geäußert:

– Überlegenheit der Biologie: Die biologische Entsprechung zu Nanomaschinen stellen funktionstragende Elemente von Zellen dar. Hoffnungen und Befürchtungen im Hinblick auf selbstreplizierende Nanomaschinen werden von Charakteristika selbstreplizierender Lebewesen abgeleitet. Zwischen diesen und jenen besteht jedoch der Unterschied, dass Lebewesen effizienter und den Umweltbedingungen besser angepasst sind (Whitesides 2001).

– Methodische Einseitigkeit: Nanotechnologie wird in den Visionen ausschließlich auf Molecular Manufactoring reduziert und blendet damit andere vielversprechende Techniken aus, welche die künftige Entwicklung vermutlich prägen werden (Bachmann 1998).

– Methodische Mängel: Vertraute Konzepte der Technik können nicht einfach in den Nanomaßstab übertragen werden. Die in visionären Szenarien beschriebenen Nanomaschinen sind ähnlich wie makroskopische Maschinen konzipiert, sollen jedoch in einem Umfeld arbeiten, das aufgrund thermischer Bewegungen stark fluktuiert, chemisch reaktiv ist und eigenen physikalischen Gesetzmäßigkeiten gehorcht, die von jenen der makroskopischen Welt abweichen. Die vorgestellten Ideen sind daher für ihren Anwendungszweck nicht tauglich (Bachmann 1998; Whitesides 2001).

Kritischen Einwänden halten stark futuristisch ausgerichtete Visionäre häufig die Existenz natürlicher Nanomaschinen entgegen: Wenn in der Natur Zellorganellen und ähnliche funktionsfähige Strukturen entstehen konnten, warum sollte es dann nicht auch dem Menschen gelingen? Entsprechend geht es in vielen Langfrist-Visionen vor allem um eine biologisch geprägte Nanotechnik. Den Kritikern wird zudem entgegnet, dass Nanomaschinen nicht nach den gleichen Kriterien wie heutige Maschinen beurteilt werden könnten. Sie würden um Größenordnungen komplexer sein und damit Lebewesen ähneln, die bereits heute vielfältige Leistungen im Nanomaßstab erbringen (Kurzweil 2001).

Eingriffstiefe beim menschlichen Körper

Wie weit also dürfen Eingriffe am menschlichen Körper gehen? Aus ethischer Sicht wirft die Weiterentwicklung der Nanotechnologie in den Lebenswissenschaften vor allem Fragen zum Selbstverständnis des Menschen und zu verbessernden Eingriffen am menschlichen Körper auf (vgl. hierzu und zum Folgenden Basler & Hofmann 2002, S. 101 ff.).

Nanotechnologie bietet die Aussicht, den menschlichen Körper tiefgreifend um- und neu zu gestalten. Aktuell wird etwa an Gewebe- und Organersatz geforscht, der mithilfe von Nano- und Stammzelltechnologie aufgebaut werden könnte. Nanoimplantate wären geeignet, Sinnesfunktionen des Menschen wieder herzustellen oder zu erweitern, aber auch, um das zentrale Nervensystem zu beeinflussen. Diskutiert werden sogar rein technische Organe und Körperteile (oder gar vollständige Körper), die im Vergleich zu biologischen Organismen Vorteile wie etwa eine erhöhte Stabilität gegenüber äußeren Einflüssen zeigen sollen. Somit steht die Frage im Raum, wie weit Menschen bei der (Um-)Gestaltung des menschlichen Körpers gehen dürfen.

Zum Menschsein gehört es, die Natur und sich selbst zu verändern. Wo also geht die Verwendung von Hilfsmitteln, die zur Natur des Menschen gehört, in unzulässige Manipulationen des menschlichen Lebens über? Kann es überhaupt eine bleibende Definition des Menschseins ge-

ben, ist Menschsein nicht eine Kategorie, die sich im Lauf der Zeit verändert? Und muss der Mensch unbedingt um die Erhaltung seiner selbst, wie wir ihn heute kennen, kämpfen (Segbers/Imbusch 2001), wo doch nicht selten auch die Meinung anzutreffen ist, der Mensch sei nicht der Weisheit letzter Schluss in der Evolution (Rohrer 2001). Die Natürlichkeit des menschlichen Körpers wurde und wird bereits infrage gestellt, z. B. durch die Gentechnologie. Nanotechnologie bietet jedoch in einem noch höheren Maße als die moderne Bio- und Gentechnologie die Perspektive, den menschlichen Körper zu „denaturieren“ (Schaber 2002).

Heute werden therapeutische Eingriffe in den menschlichen Körper in weitem Maße akzeptiert. Als problematisch gelten vor allem Einwirkungen, die einen Menschen als Person verändern. Dazu würden beispielsweise Neuroimplantate zählen, die das individuelle Gedächtnis beeinflussen (Schaber 2002). Grenzen zwischen Nanotechnologie und anderen Technologien zu ziehen, ist jedoch auch hier schwierig, da mit der Verabreichung bestimmter Psychopharmaka und neurochirurgischen Eingriffen – etwa bei an Epilepsie Erkrankten –, die heute allgemein akzeptiert werden, Gedächtnis und Identität eines Menschen ebenfalls merklich beeinflusst werden können.

Problematisch sind zudem Entwicklungen, welche die menschliche Natur – normativ verstanden – infrage stellen und damit die moralische Orientierung erodieren, wie dies bei künstlichen menschenartigen Lebewesen der Fall wäre. Zentrale Elemente des Verständnisses der menschlichen Natur sind weitgehend unabhängig vom kulturellen Kontext und vielfach wesentlich für ein geordnetes menschliches Zusammenleben. Dazu zählen etwa die positive Wertung von Fairness, Gerechtigkeit und Verlässlichkeit oder die Idee, dass Menschen schicksalhaften Einflüssen unterworfen sind, die sie akzeptieren müssen (Schaber 2002). Doch indem die Arbeit des Menschen am Menschen vorangetrieben wird, läuft die Gesellschaft Gefahr, das Bild des autonomen und mündigen Menschen zu verspielen (Schirrmacher 2001b).

An dieser Stelle könnte argumentiert werden, dass sich viele Fragen rund um das menschliche Selbstverständnis umgehen ließen, wenn die Umgebung von Menschen mithilfe der Nanotechnologie intelligenter, flexibler und menschenfreundlicher gestaltet würde, statt anzustreben, den Menschen mithilfe nanotechnischer Verfahren umzugestalten (König 2001). Habermas weist darauf hin, dass die Grenze zwischen heilenden und verbessernden Eingriffen aus begrifflichen – insbesondere sind die Begriffe „Gesundheit“ und „Krankheit“ bis heute nicht geklärt – und praktischen Gründen fließend ist. Präzise Grenzen zu ziehen und durchzusetzen sei daher wenig realistisch. Vertreter einer liberalen Eugenik ziehen daraus den Schluss, keine Grenzen zwischen therapeutischen und verbessernden Eingriffen anzuerkennen und „die Auswahl der Ziele merkmalsverändernder Eingriffe den individuellen Präferenzen von Marktteilnehmern“ zu überlassen (Habermas 2001). Auch wenn die Grenzen zwischen Therapie und Verbesserung unscharf sind, so lassen sich doch viele Fälle eindeutig einer von beiden Kategorien zuordnen. Im Übergangsbereich zwischen Therapie und Verbesserung sind gesellschaftliche Entscheidungen erforderlich (Schaber 2002).

Dabei sind Verbesserungen nicht nur aus der Perspektive der zu behandelnden Person, sondern auch hinsichtlich der gesellschaftlichen Auswirkungen zu betrachten. Beispielsweise werfen Verbesserungen Verteilungsfragen auf: Welche Möglichkeiten der Verbesserung sollen allen zugänglich gemacht werden, etwa indem eine Krankenkasse die Behandlung bezahlt? Welche Möglichkeiten bleiben dem Einzelnen überlassen, der oder die eine Behandlung wünscht und sie sich leisten kann? Potenziell könnten Verbesserungen massive soziale Ungleichheiten zur Folge haben. Zu bedenken ist zudem die Möglichkeit gesellschaftlich erwünschter Verbesserungen, etwa um die Gewaltbereitschaft auffällig gewordener Menschen zu senken oder die Gesundheit und Leistungsfähigkeit von Arbeitnehmern, die einem besonderen Umfeld ausgesetzt sind, sicherzustellen. Die Beantwortung dieser Fragen erfordert noch eine intensive Diskussion. Sobald die Verbesserung entscheidende Auswirkungen in der Verteilung von Ressourcen zwischen verschiedenen Mitgliedern der Gesellschaft nach sich zieht, besteht zudem neuer Regelungsbedarf (Schaber 2002).

Kann zur Klärung von Fragen rund um Eingriffe am menschlichen Körper die begriffliche Unterscheidung zwischen Mensch und Person beitragen? Menschen sind gekennzeichnet durch ihre biologische Präsenz, typische Merkmale, welche die biologische Gattung Mensch bestimmen. Personen dagegen verfügen über kulturell bestimmte Eigenschaften und Fähigkeiten. Kant schreibt jedem vernünftigen Wesen Würde zu, die es als Ausdruck seiner Freiheit und Unabhängigkeit von bloßer Naturkausalität erlangt. Ein solches Wesen existiert als Zweck an sich. Eine Person erringt und bewahrt ihre Würde im sozialen Raum. Menschen darf es daher nicht verwehrt sein, sich zur Person und als Person zu entwickeln. Personen teilen einen Kernbereich rationaler und moralischer Eigenschaften, der seinen Ausdruck unter anderem in den Menschenrechten gefunden hat (Sturma 2001).

Muss es sich bei einer Person aber grundsätzlich um einen Menschen handeln? Visionen zur Nanotechnologie werfen die Frage auf, inwiefern auch technische bzw. teils technisch, teils biologisch konstruierte Wesen den Status einer Person beanspruchen können.

Unter diesem Gesichtspunkt erscheint es u. U. möglicherweise konsequent, diese Rechte auch anderen „Personen“ als Menschen zuzusprechen, z. B. Mensch/Maschine-Mischwesen. Eine solche Einschätzung würde allerdings tiefgreifende Fragen aufwerfen: Schließt der Anspruch von Menschen auf Selbsterhaltung und Selbsterweiterung das Überschreiten der eigenen Gattungsgrenzen ein? Menschen genießen heute in vielen Gesellschaften einen umfassenden Schutz, auch wenn sie, wie etwa Embryonen, (noch) nicht als Personen bezeichnet werden (können). Sollen nicht menschliche Systeme, die zu einer Person entwickelt werden oder reifen könnten, denselben Schutz beanspruchen? Würden mit zunehmender Bedeutung nicht menschlicher Personen die Schutzrechte für

Menschen, die keine Personen sind, zurückgedrängt? Wie können gerechte Gegenseitigkeitsverhältnisse gewahrt bleiben, die verhindern, dass Personen von anderen Personen bloß als Mittel oder Sache behandelt werden?

Solche und ähnliche Fragen bedürfen mit der Weiterentwicklung von Nanotechnologie und ihrem Einsatz in den verschiedenen Anwendungsbereichen – insbesondere im Bereich der Lebenswissenschaften – offenbar noch einer genaueren Diskussion und Klärung.

Der menschliche Körper als reparaturbedürftige biologische Maschine

Aus naturwissenschaftlicher Perspektive lässt sich der menschliche Körper funktional als biologische Maschine betrachten, deren Funktionsweise sich dem Verständnis zunehmend erschließt. Dadurch wird es einerseits möglich, Funktionsstörungen (Krankheiten) immer wirksamer zu therapieren, es wachsen aber auch die Ansprüche an körperliche Perfektion und Gesundheit.

Gesundheit ist jedoch kein absolut definierter Begriff. Die Weltgesundheits-Organisation (WHO) beispielsweise beschreibt Gesundheit als „Zustand vollkommenen körperlichen, psychischen und sozialen Wohlbefindens, nicht nur definiert durch die Abwesenheit von Krankheit oder Behinderung“ (Charta der WHO, zitiert nach Mieth 1994)[52]. Nach dieser Definition ließe sich auch das Altern als Krankheit deuten (Linke 1993). Zu den großen Hoffnungen, die auch mit der Nanotechnologie verbunden werden, gehört die Erwartung, negative Folgen des Alters abmildern und das menschliche Leben (bei weitgehender Gesundheit) erheblich verlängern zu können. Hoffnungen dieser Art werden nicht nur von Extropiern und Transhumanisten (s. Kapitel VIII.3) gehegt, sondern auch von weniger ideologischen oder enthusiastischen Verfechtern der Nanotechnologie (Roco/Bainbridge 2001b, S. 16). So wird u. a. vorausgesagt, dass in absehbarer Zeit Menschen bis weit in ihr zweites Lebensjahrhundert ein aktives und würdiges Leben führen werden. Da körperliche und intellektuelle Leistungsfähigkeit oder Schönheit einen hohen gesellschaftlichen Stellenwert haben, können zudem Maßnahmen, welche die Konzentrationsfähigkeit verbessern oder der Hautalterung entgegen wirken, als „Gesundheits-Maßnahmen“ verstanden werden.

Durch neue technologische Möglichkeiten könnte also der menschliche Körper zunehmend als „reparaturbedürftige biologische Maschine“ betrachtet werden. Bei diesen Reparaturen würde dann möglicherweise auch verstärkt auf nanotechnologisch hergestellte Implantate zurückgegriffen werden.

Molekulare Maschinentechnologie

Ein weiterer Aspekt des Verhältnisses von Mensch und Maschine im nanotechnologischen Anwendungsgebiet Gesundheit ergibt sich aus Visionen zu Nanomaschinen. Nach Ansicht K. Eric Drexlers werden Nanomaschinen die Medizin revolutionieren: Statt wie bisher eine Vielzahl von Krankheiten zu bekämpfen, sollen stattdessen Nanomaschinen im menschlichen Körper darüber wachen, dass ein optimaler Gesundheitszustand permanent aufrechterhalten wird. Kommt es dennoch zu einem Notfall, wird der Organismus in einen Zustand der „Biostasis“ versetzt, in dem die momentane Situation bis auf molekulares Niveau herab konserviert wird. Die so erhaltenen Körper können nach einer geeigneten Reparatur oder ggf. zu einem späteren Zeitpunkt, wenn bessere nanomedizinische Verfahren zur Verfügung stehen, wiedererweckt werden. Auf diese Weise wird – so die Vision – ein nahezu unbegrenztes Leben möglich.

In einem 1991 veröffentlichen Buch von Drexler und Peterson wird in den darin vorgestellten Medizinszenarien von Nanomaschinen ausgegangen, die in der Regel deutlich kleiner als eine Zelle und in der Lage sind, biologisches Gewebe umfassend zu manipulieren. Auf diese Weise soll es etwa gelingen, Verletzungen innerhalb kurzer Zeit perfekt ausheilen zu lassen oder die „Krankheit Alter“ zu überwinden. Die heute oft noch verhältnismäßig groben Verfahren der Medizin würden durch besser planbare und gezielte Methoden ersetzt. Die Entwicklung solcher Methoden erfordert allerdings erhebliche technische Fortschritte, deren Machbarkeit noch nicht erwiesen ist, und wesentlich verfeinerte Kenntnisse über die Funktionsweise des menschlichen Körpers (vgl. Kapitel VII.2.3). Diese Feststellung betrifft z. B. auch optimistische Langfrist-Visionen autonomer „Nano-U-Boote“, die im menschlichen Blutkreislauf patrouillieren und Medikamente zielgenau, besser dosiert und nebenwirkungsfrei in erkranktes Gewebe transportieren.

In einem aktuellen Delphi-Verfahren wurde die Frage gestellt, wann Nanoroboter erstmals in der Medizin zum Einsatz kommen werden. Sieben von 28 befragten Experten äußerten sich dazu nicht. Der Mittelwert der von den übrigen 21 Experten angegebenen Jahreszahlen lag bei 2031, bei einer Standardabweichung von 22 Jahren (basics 2002). Dieses Ergebnis spiegelt die gegenwärtige Unsicherheit über die Realisierbarkeit und mögliche Realisierungshorizonte von Nanomaschinen wider. Einer der Befragten wies darauf hin, dass bisher keine allgemein akzeptierte Definition von Nanorobotern existiert. Einfache biomimetische Strukturen für Spezialaufgaben würden voraussichtlich wesentlich schneller zu realisieren sein als eigentliche Nanoroboter, die sich autonom im Körper bewegen und verschiedene Aufgaben ausführen können (basics 2002).

Die Beurteilung, ob es eine molekulare Maschinentechnologie geben wird, hängt sehr stark davon ab, was man unter diesem Begriff versteht. Unstrittig ist, dass man die Funktionsweise biologischer und künstlicher molekularer Motoren auf der Nanometerskala untersuchen kann. Auch die gezielte Herstellung künstlicher Motoren gelingt über chemische Synthese zunehmend besser. Mehrere Arbeitsgruppen weltweit konnten zeigen, dass sich biologische Motoren, wie z. B. ATPase, künstlich modifizieren und

[52] Im Gegensatz zum weitgefassten Begriff der Gesundheit sieht das deutsche Grundgesetz ein Recht auf Leben und „körperliche Unversehrtheit“ vor, das enger als der Begriff „Gesundheit“ umschrieben ist.

sich deren Eigenschaften so gezielt einstellen lassen. Dieser Bereich der Grundlagenforschung ist also heute schon Realität. Alle weiteren Schritte sind bisher aber noch weitgehend ungeklärt. Es gibt zahlreiche Argumente, dass eine Realisierung schwierig oder unmöglich sein könnte. Auf der anderen Seite gibt es keine wirklich eindeutigen Beweise dafür, dass die genannten Visionen nicht realisierbar sind. Aus heutiger Sicht ist es daher offen, ob es jemals gelingen wird, Maschinen zu entwickeln, die beispielsweise Reparaturen im menschlichen Körper ausführen könnten.[53]

Neurotechnologie

Auf neuronaler Ebene wird intensiv an einer Verbindung der molekularbiologischen Welt mit der technischen Welt gearbeitet. Wäre man beispielsweise nach dem biologischen Vorbild des Gehirnaufbaus in der Lage, künstliche hybride neuronale Netze aufzubauen, könnten hochflexible, lernfähige Systeme für informationstechnische Anwendungen hergestellt werden. Ein weiteres interessantes Entwicklungsgebiet stellen nanoelektronische Neuroimplantate (Neurobionik) dar, die Schäden an Sinnesorganen oder am Nervensystem kompensieren bzw. die Leistungsfähigkeit dieser Organe erhöhen und das menschliche Wahrnehmungsspektrum verbreitern. International wird intensiv an Mikroimplantaten gearbeitet, die insbesondere die Funktionsfähigkeit von Gehör und Sehsinn wieder herstellen sollen. Bereits heute können z. B. einfache Cochlear- oder Retinaimplantate realisiert werden. Auch Epilepsieanfälle können durch Elektroden, die ins Gehirn eingepflanzt werden und dort Nervengewebe stimulieren, abgemildert oder verhindert werden (VDI-TZ 2002, S. 90). Obwohl Nervenzellen bereits auf der Mikrometerskala angesprochen werden können, sollte durch die Nanobiotechnologie besonders in Bezug auf die Entwicklung molekularer Schnittstellen eine Verbesserung des technisch-biologischen Informationsaustausches zu erzielen sein. Durch Fortschritte bei der Nanoinformatik könnten so die o. g. Implantate den Dimensionen der natürlichen Systeme und deren Leistungsfähigkeit angenähert werden.

Während die Neuritenbildung (John et al. 1997), die Konstruktion von definierten Netzwerken von Neuronen (Craighead et al. 2001) sowie die unmittelbare Verknüpfung von Nervenzellen mit elektronischen Halbleiterbauelementen auf molekularer Ebene (Winter et al. 2001) bereits gelungen sind, befinden sich hingegen künstliche hybride neuronale Netzwerke noch im Stadium der reinen Grundlagenforschung. Komplexe Netzwerke würden analog zum menschlichen Gehirn hochflexibel und lernfähig sein, sowie bestimmte Aufgabenstellungen äußerst schnell bearbeiten können. Hier bietet sich die Möglichkeit zu einer konstruktiven Synergie zwischen den Forschungen für den anwendungsnäheren Bereich der Lebenswissenschaften und den noch visionären neurotechnologischen Systemen zur Informationsverarbeitung an. Da im Rahmen der Neurotechnologie zudem noch die direkte Ankopplung an das menschliche Gehirn thematisiert wird, dürften die Entwicklungen innerhalb dieses Technologiebereichs noch große Aufmerksamkeit auf sich ziehen und kontrovers diskutiert werden (VDI-TZ 2002, S. 93).

Künstliche Gehirne

Eine u. a. bereits aus den Debatten zur Künstlichen Intelligenz bekannte Frage ist, inwieweit durch Fortschritte im Computerbereich Maschinen geschaffen werden könnten, die über alle Fähigkeiten des menschlichen Gehirns verfügen. Sie spielt auch in den visionären Diskursen zur Nanotechnologie eine wichtige Rolle. Im eher futuristischen Diskurs im Umfeld des Foresight Institute und der Extropier wird die informationstechnische Speicherung des menschlichen Bewusstseins voraussagt (Kurzweil 1999). Forscher, die sich am visionären Diskurs im Umfeld der US-amerikanischen National Nanotechnology Initiative (NNI) beteiligt haben, schätzen, dass innerhalb der nächsten 25 Jahre künstliche Gehirne geschaffen werden können (Cauller/Penz 2001). Diese künstlichen Gehirne könnten möglicherweise dem menschlichen Gehirn ähnliche Funktionen haben und untereinander (sowie langfristig mit menschlichen Gehirnen) vernetzt werden.

In der Robotik und Neurophysiologie herrscht die Ansicht vor, dass Intelligenz einen Körper benötigt, der mit der Umwelt in Wechselwirkung tritt. Intelligenz kann also nicht einfach mit Rechenleistung gleichgesetzt werden, sondern setzt unter anderem die Entwicklung einer ausgefeilten Sensorik und Motorik voraus. In beiden Bereichen wurden in den letzten Jahrzehnten aber weit weniger schnelle Fortschritte als bei der Rechenleistung von Computern erzielt (Pfeifer 2001). Zudem wird das oft zitierte Moore'sche Gesetz häufig falsch bzw. zu allgemein interpretiert. Nach diesem Gesetz verdoppeln Computer etwa alle anderthalb Jahre ihre Geschwindigkeit. Das gilt jedoch nur für die Hardware, nicht für Software, deren Entwicklung wesentlich langsamer verläuft: Mit zunehmendem Komplexitätsgrad der Software wird es anspruchsvoller, Fehler zu vermeiden. Angesichts des extrem hohen Komplexitätsgrades des menschlichen Gehirns und seiner Plastizität (i. e. die Fähigkeit zur Strukturveränderung, z. B. als Reaktion auf Verletzungen) ist es höchst zweifelhaft, dass ein Computer in absehbarer Zeit über alle Fähigkeiten des menschlichen Gehirns verfügen wird (Vogel 2001, S. 146 f.).

Entwicklungstendenzen im Anwendungsgebiet Gesundheit

Künftig werden voraussichtlich bei vielen Anwendungen Nano- und Biotechnologie zusammenspielen, z. B. bei der Entwicklung künstlicher Gewebe und Organe. Wenn

[53] Theoretisch wäre es möglich, durch DNA-Veränderungen jede gewünschte Modifikation an einem Organismus vorzunehmen. Die Komplexität von Lebewesen bedeutet jedoch in der Praxis, dass solche Modifikationen schwierig sind. Als ähnlich aufwendig und langwierig wird sich wohl auch die Gestaltung von Materie mithilfe der Nanotechnologie erweisen (Lanier 2000).

alternde, kranke Organe und Gewebe zunehmend ersetzt werden können, könnte sich die Medizin vermehrt zum Reparatur- und Wartungsbetrieb am menschlichen Körper entwickeln. Bei vielen Patienten wäre ein veränderter, sorgloserer Umgang mit dem eigenen Körper zu erwarten. Dabei handelt es sich nur um eine von vielen denkbaren Nebenwirkungen primär schadenvermeidender Aspekte, die genauer untersucht werden müssen.

Die Gesundheitstechnologie ist mit neueren Entwicklungen des Gesundheitswesens, etwa dem Disease Management, verknüpft. Mit Unterstützung der Informations- und Kommunikationstechnologie werden Funktionen, die für die umfassende Versorgung der Patienten benötigt werden, bereit gestellt. Damit werden unter anderem die Grenzen zwischen Diagnose und Therapie, Implantaten und medizinischen Geräten durchlässiger (Nassauer/Feigl 2002).

Zu einer weiteren – kritischeren – Ansicht kommt jedoch eine Studie des schweizerischen Zentrums für Technologiefolgenabschätzung. Zu Nanotechnologie und Medizin wurden 28 internationale Experten befragt. Die Mehrheit dieser Experten war der Ansicht, die Zeitspanne zwischen Forschung und Anwendung werde heute stark untertrieben und zu kurz angesetzt. Ein Teil der Experten hält zudem im medizinischen Bereich die Erwartungen im Hinblick auf eine schnelle Umsetzung der Visionen in eine konkrete Anwendung für besonders unrealistisch (basics 2002).

3.2 Verteilungsgerechtigkeit und Selbstbestimmung

Die im Folgenden kurz angesprochenen Fragen sind nicht spezifisch für die Nanotechnologie, sondern stellen sich auch in Bezug auf andere technologische Neuentwicklungen – und zwar insbesondere bei solchen, welche die medizinische Versorgung betreffen. Bei der Umsetzung von nanotechnologiebasierten Verfahren und Anwendungen werden sie am konkreten Einzelfall immer wieder diskutiert werden müssen (vgl. Basler & Hofmann 2002, S. 104 f.).

Chancen-Verteilung

Im Zuge der weiteren Entwicklung und Verbreitung der Nanotechnologie können sich Verteilungsfragen ergeben, die sich auf den umfassenden und ungehinderten Zugang zu den auf wissenschaftlich-technischem Know-how beruhenden Anwendungen und Produkten beziehen. Dies betrifft beispielsweise die Verteilung der Chancen zur Nutzung von Ergebnissen nanotechnologischer Forschung und Entwicklung (etwa bei medizinischen Behandlungen) zwischen Angehörigen wohlhabender und weniger wohlhabender Nationen, innerhalb einer Gesellschaft die Verteilung der Nutzungschancen zwischen wohlhabenden und weniger wohlhabenden, gut informierten und weniger gut informierten sowie in städtischen (mit spezialisierten Einrichtungen gut ausgestatteten) und abgelegenen Regionen lebenden Personen.

Schadensvermeidung

Aus ethischer Sicht ist das Ziel einer Schadensvermeidung ein wesentlicher Aspekt. Nutzen, Kosten, Chancen und Risiken neuer Techniken müssen gegeneinander abgewogen werden. Es muss geklärt werden, welche Mittel die jeweils betroffene Gemeinschaft zur Risikoverminderung einzusetzen bereit ist. In vielen Fällen wird Schadensvermeidung dadurch erschwert, dass eine technische Entwicklung verschiedene Anwendungen erlaubt oder Chancen und Risiken in verschiedenen Bereichen auftreten (Basler & Hofmann 2002, S. 105).

Nanotechnologieunterstützte Diagnostik könnte u. U. die gesundheitlichen Risiken chronisch Kranker reduzieren helfen. Eine permanente Überwachung wichtiger Parameter würde es erlauben, bei ungünstigen Veränderungen rasch einzugreifen. Zudem könnte in gefährlichen Situationen automatisch Hilfe herbeigerufen werden. Andererseits würden bei einer permanenten Überwachung erhebliche Mengen gesundheitsrelevanter Daten erhoben. Damit stellen sich neue Fragen zum Datenschutz. Zudem müssen auch soziale Aspekte berücksichtigt werden. Beispielsweise könnten Patienten, denen aufgrund eines implantierten Diagnose- und Dosiergeräts von ihrer Umgebung Misstrauen entgegengebracht wird, psychische Schäden erleiden.

Um die Risiken möglichst gering zu halten, sollte wenn immer möglich der Grundsatz verfolgt werden, ein gegebenes Bedürfnis auf die jeweils risikoärmste Art und Weise zu befriedigen. Ganzheitliche Risikoanalysen, etwa in Anlehnung an das Health Technology Assessment konzipiert, können Entscheidungsträger bei der Abwägung zwischen Chancen und Risiken unterstützen.

Autonomie und Selbstbestimmung

Der Respekt für Autonomie und Selbstbestimmung, wozu z. B. auch die Achtung der Privatsphäre zählt, ist ein wichtiges Prinzip der biomedizinischen Ethik (Hüsing 1998).

Wenn z. B. künftig kleine Diagnoseeinheiten – Labs-on-a-Chip – es ermöglichen, in Einrichtungen des Gesundheitswesens oder zu Hause umfassende persönliche Diagnosen zu erstellen, kann auf diese Weise potenziell eine große Fülle von besonders schützenswerten Gesundheitsdaten gewonnen werden, die in manchen Fällen auch Auskunft über die Aktivitäten und Lebensgewohnheiten eines Patienten geben, in anderen nicht nur den aktuellen Zustand widerspiegeln, sondern auch eine gesundheitliche Prognose erlauben. Zudem besteht die Gefahr, dass Ehepartner, Vorgesetzte oder Berufskollegen, private Bekannte etc. künftig versuchen könnten, ohne zuvor erfolgte Rücksprache oder Einwilligung, z. B. mithilfe eines verlorenen Haares, eines blutigen Pflasters eine Diagnose erstellen zu lassen. An den Datenschutz und damit den Schutz der Privatsphäre werden daher hohe Anforderungen gestellt. Ohne ausreichenden Schutz der Privatsphäre werden Menschen manipulierbar, wird ihre Autonomie und Handlungsfreiheit infrage gestellt.

Zudem muss – ähnlich wie bei der Gendiagnostik – geklärt werden, wie mit Ergebnissen umzugehen ist, welche die betroffenen Patienten möglicherweise über längere Zeiträume bis zum Eintreten oder Nichteintreten einer schweren Erkrankung belasten. Der Umgang mit Diagnoseunsicherheiten stellt in diesem Zusammenhang ebenfalls ein wichtiges Thema dar.

Labs-on-a-Chip werden nicht nur individuelle Diagnosen erleichtern, sondern auch schnelle Massen-Screenings ermöglichen. Damit könnten sich Einzelne sozialem Druck ausgesetzt sehen, der ihre Handlungsfreiheit beeinträchtigt. So könnte das soziale Umfeld etwa darauf hinwirken, sich auf frühe Anzeichen einer schweren Krankheit testen zu lassen, um diese Krankheit rechtzeitig behandeln zu lassen und der Gemeinschaft später nicht durch aufwendige Behandlungen zur Last zu fallen. Oder Eltern, die sich Testverfahren während der Schwangerschaft verweigern, wären dem Vorwurf ausgesetzt, ihrem Kind möglicherweise ein von Krankheit und Behinderung geprägtes Leben aufzuzwingen (Basler & Hofmann 2002, S. 107).

Falls nanotechnologische Anwendungen die Außensteuerung von Menschen erlauben sollten, wäre diese Entwicklung aus ethischer Sicht problematisch (Schaber 2002). Autonomie und Handlungsfreiheit können zudem beeinträchtigt werden, wenn Menschen Fähigkeiten erwerben, mit denen sie aufgrund ihrer natürlichen Ausstattung nicht umgehen können (Segbers/Imbusch 2001).

Demgegenüber sehen optimistische Verfechter einer Nanotechnologie, die entscheidend in den menschlichen Körper eingreift, darin eine grundsätzliche Verbesserung der Autonomie: Der Mensch verfüge stärker über seinen Körper und seine individuellen Entwicklungsmöglichkeiten als bisher.

3.3 Sicherheitspolitische Implikationen

Innerhalb der seit ca. 20 Jahren besonders in den USA geführten Diskussion zu den Perspektiven der Nanotechnologie haben selbst die größten Befürworter dieser Technologie auch vor den Gefahren ihrer missbräuchlichen und unkontrollierten Nutzung gewarnt. Hierbei wurde auch auf militärische Aspekte eingegangen. Erste Vorschläge für internationale Abkommen zum Umgang mit Nanotechnologie wurden ebenfalls bereits erarbeitet.

In den letzten zwei Jahren hat die Diskussion zu den möglichen Risiken dieses Technologiefeldes eine neue Qualität erreicht. Abgeleitet aus den Möglichkeiten der drei Zukunftsfelder Gentechnologie, Nanotechnologie und Robotik/Künstliche Intelligenz wurde in Form von Langfrist-Visionen ein zukünftig denkbares Gefahrenpotenzial – insbesondere durch selbstreplizierende, autonom agierende und destruktive Nanoroboter – beschrieben, das sich – so z. B. die Warnungen K. Eric Drexlers (Drexler 1986) und Bill Joys (Joy 2000) – zu einer umfassenden Bedrohung entwickeln könnte (vgl. Kapitel VIII). Diese Schreckensvisionen haben der Diskussion über die Möglichkeiten und Grenzen der Nanotechnologie teilweise utopisch anmutende, wenn nicht irrationale Züge gegeben (Tolles 2001).

Parallel hierzu hat die reale Welt der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Nanotechnologie in den letzten zehn bis 15 Jahren insbesondere in den etablierten Technologiefeldern Werkstoffe, Elektronik, Sensorik und Biotechnologie ein Vielzahl neuer innovativer Ansätze erbracht. Die sich hieraus ergebenden sicherheitspolitischen und vor allem militärischen Implikationen sind zwar weniger spektakulär als die genannten utopisch wirkenden Zukunftsbilder, lassen aber dennoch beträchtliche Auswirkungen erwarten.

Erklärtes Hauptziel jeder Sicherheitspolitik ist der Schutz der jeweiligen Staaten vor jeder Art von Bedrohung durch innere und äußere Feinde. Hierfür gibt es eine Reihe von Maßnahmen, die dazu dienen, gewaltsame Auseinandersetzungen (Konflikte, Kriege) durch Anwendung polizeilicher und militärischer Mittel zu vermeiden, einzudämmen oder zu beenden. Neben dieser relativ engen Sichtweise setzt sich zunehmend die Erkenntnis durch, dass eine erfolgreiche Sicherheitspolitik eine Vielzahl von darüber hinausgehenden Aspekten zu berücksichtigen hat. Hierzu zählen auf nationaler Ebene Maßnahmen, die zur Herstellung und Aufrechterhaltung der inneren Sicherheit dienen, wie z. B. gute Bildungs- und Gesundheitssysteme sowie soziale Absicherung. Auf internationaler Ebene sind weitere Faktoren einzubeziehen, die zwischenstaatliche Konflikte gar nicht erst entstehen oder diese ohne Einsatz militärischer Mittel beilegen lassen.

Die meisten der bisher veröffentlichten Überlegungen zu den sicherheitspolitischen Implikationen der Nanotechnologie, die praktisch alle aus den USA stammen, gehen von einem solchen erweiterten Sicherheitsbegriff aus. Durch die Einstufung der Nanotechnologie als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts mit großem ökonomischen Potenzial ergibt sich aus dieser Sicht unmittelbar eine enorme Bedeutung für die nationale Sicherheit. Wie für andere Zukunftstechnologien (z. B. Computertechnik, Biotechnologie, Raumfahrttechnik) wird in den USA auch für die Nanotechnologie die bereits vorhandene oder angestrebte Spitzenstellung im internationalen Vergleich als ein wichtiger Beitrag zur nationalen Sicherheit angesehen. Dieser direkte Bezug zwischen technologisch-wissenschaftlicher, ökonomischer und militärischer Stärke bildet seit vielen Jahren ein Grundelement des US-amerikanischen Staatsverständnisses und hat wesentlich zur derzeitigen Dominanz der USA in der heutigen Welt beigetragen.

Ein weiteres, aus sicherheitspolitischer Sicht destabilisierendes Element ist die zunehmende Asymmetrie zwischen den reichen Industrieländern und den Ländern der Dritten Welt. Die gesamte auf Nanotechnologie basierende Forschung, Entwicklung und Produktion erfordert Fähigkeiten, die praktisch nur durch hochentwickelte Staaten zu erbringen sind. Durch den Querschnittscharakter dieses Technologiefeldes müssen diese eine Vielzahl unterschiedlicher instrumenteller und organisatorischer Voraussetzungen erfüllen. Hierzu dürften heute und in absehbarer Zukunft nur wenige Hauptakteure wie USA, Europa, Japan, China, Russland und einige Hightech-Schwellenstaaten im Stande sein. Daher ist derzeit nicht

erkennbar, dass sich die Technologielücke zwischen Reich und Arm durch Nanotechnologie verringern lässt. Eher könnte das Gegenteil der Fall zu sein.

Schon heute existieren Ansätze zu einer Diskussion über Rüstungskontrollfragen im Bereich der militärischen Nutzung von Nanotechnologie. Dabei wird sowohl auf die langfristigen Schreckensvisionen autonom agierender Nanoroboter eingegangen als auch auf dringlicher erscheinende Probleme, wie z. B. kurz- bis mittelfristig mögliche Effizienzsteigerungen und Verbesserungen der Handhabbarkeit biologischer und chemischer Waffen durch Mikro- und Nanotechnologie (Altmann/Gubrud 2002). Vorgeschlagen werden hier u. a. vertrauens- und sicherheitsbildende Maßnahmen, eine internationale Kooperation der verschiedenen Nanotechnologie-Initiativen und vorsorgliche Maßnahmen hinsichtlich denkbarer langfristiger Probleme (wie z. B. das Verbot der Produktion von nanotechnologischen Systemen, die sich in natürlicher Umwelt selbstreplizieren können).

4. Zusammenfassung

Wirtschaftliche Aspekte

Mit der Nanotechnologie wird die Hoffnung auf bedeutende Umsatzpotenziale in fast allen Branchen der Wirtschaft verbunden. Zwar steckt die Marktdurchdringung von nanotechnologischen Verfahren und Produkten noch ziemlich in den Anfängen, jedoch hat eine Reihe von Produkten und Verfahren bereits den Weg in den Markt gefunden.

Der Einfluss nanotechnologischer Erkenntnisse auf verkaufbare Produkte besteht schon seit Jahren in den Bereichen Elektronikherstellung, Datenspeicherung, funktionelle Schichten oder Präzisionsoptiken. In den letzten Jahren sind nanotechnologische Erkenntnisse zunehmend auch in die Felder Biologie, Chemie, Pharmazie und Medizin eingeflossen, und dieser Trend wird voraussichtlich weiter anhalten. Bereits heute sind deutliche Einflüsse nanotechnologischer Erkenntnisse auf Milliardenmärkte bei der Pharmakaherstellung, medizinischen Diagnostik, Analytik oder bei chemischen und biologischen Katalysatoroberflächen zu erkennen.

Zu unterscheiden sind die direkten Umsätze mit Nanokomponenten und die Umsätze mit Produkten, in denen Nanotechnologien inkorporiert sind. Das Datenmaterial zur wirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie ist allerdings – nicht nur in Deutschland – noch sehr lückenhaft, eine allgemein anerkannte breite Datenbasis ist bisher noch nicht erarbeitet worden bzw. liegt nicht öffentlich zugänglich vor.

Eine Studie des Bankhauses Sal. Oppenheim jr. & Cie. stellt fest, dass letztlich die Hebelwirkung der neuen Technologie als entscheidend für das Marktvolumen anzusehen ist. Wesentlich seien nicht der direkte Umsatz und die Gewinne, die mit Nanotechnologieprodukten selbst erzielt würden, sondern die vielfältigen Auswirkungen der Technologie in verschiedensten Anwendungsbereichen. Unternehmen, die sich auf Nanotechnologie konzentrieren, seien gezwungen, den schwierigen Übergang von der wissenschaftlichen Forschung zum Massengeschäft zu meistern. Als hilfreich werde sich dabei oft die Entwicklung strategischer Partnerschaften erweisen.

Positive Folgen für Gesundheit und Umwelt

Für die Bereiche Gesundheit und Umwelt werden durch den Einsatz von Nanotechnologien deutliche Entlastungseffekte vermutet bzw. erhofft. Zu den positiven Folgen nanotechnologischer Entwicklungen für die Gesundheit zählen u. a. die Entwicklung neuer Diagnose- und Therapieverfahren, erhebliche Erkenntnisfortschritte in den Biowissenschaften und im Verständnis biologischer Prozesse, die Entwicklung neuer und die Optimierung bekannter Medikamente und Agrochemikalien.

Mithilfe nanotechnologiebasierter Diagnoseinstrumente wird es künftig voraussichtlich möglich sein, Krankheiten oder Dispositionen für Krankheiten früher als bisher zu erkennen. Durch die Entwicklung von Chips (Labs-on-a-Chip-Technologie) würde die sich bereits abzeichnende Tendenz hin zu einer zielgenauen, individualisierten Medizin weiter gefördert. Bei der Therapie besteht Aussicht, mithilfe der Nanotechnologie gezielte und nebenwirkungsfreie Behandlungen zu entwickeln. Die breite Anwendung nanopartikulärer Dosiersysteme könnte zu Fortschritten bei der medikamentösen Behandlung führen. Durch Verfahren der Nanotechnologie kann die Biokompatibilität künstlicher Implantate verbessert werden.

Relativierend ist anzumerken, dass mit wenigen Ausnahmen die positiven Auswirkungen von Nanotechnologie auf die menschliche Gesundheit jedoch bisher überwiegend hypothetisch sind und in der Praxis noch erhebliche Hindernisse überwunden werden müssen.

Entlastungseffekte für die Umwelt können sich durch die Einsparung von stofflichen Ressourcen, die Verringerung des Anfalls von umweltbelastenden Nebenprodukten, die Verbesserung der Effizienz bei der Energieumwandlung, die Verringerung des Energieverbrauchs und die Entfernung Umwelt belastender Stoffe aus der Umwelt ergeben.

Mögliche negative Folgen für Gesundheit und Umwelt

Einen Schwerpunkt dieser Diskussion bildet die Frage nach den Auswirkungen einer unkontrollierten Freisetzung von Nanopartikeln. Zum Stand der Forschung über die Gesundheits- und Umweltrelevanz der Nanotechnologien ist derzeit generell festzustellen, dass die vorliegenden Untersuchungsergebnisse hinsichtlich ihrer Belastbarkeit begrenzt sind. Vermutungen über mögliche negative Folgen der Inhalation von Nanopartikeln basieren bisher im Wesentlichen auf Analogieschlüssen zu Ergebnissen vorliegender Untersuchungen über die Wirkungen ultrafeiner Partikel.

Ultrafeine Partikel können nachweislich chemische Reaktionen im Körper katalysieren. Die Aufnahme ultrafeiner Partikel in Zellen kann Reaktionen des Immunsystems auslösen. In vielen Anwendungsbereichen der Nanotechnologie treten Nanotubes auf, die als lungengängige Fasern möglicherweise ähnliche gesundheitliche Folgen

nach sich ziehen könnten wie Asbestfasern. Nanopartikel können Zellmembranen verhältnismäßig leicht durchdringen und damit neben dem erwünschten auch zu einem unerwünschten Transport von Wirkstoffen über biologische Barrieren führen. Die Pharmakokinetik von Wirkstoffen, die mit Nanopartikeln verabreicht werden, ist heute erst ansatzweise bekannt.

Über Lebensmittel und Kosmetika kommt der menschliche Körper bereits heute vielfach mit Nanopartikeln in Kontakt (z. B. Farbstoffe, UV-Filter), wobei die Grenzen zwischen Medikamenten und Kosmetika zunehmend unscharf werden. Darüber hinaus verändern Fortschritte in der Kosmetik die gesellschaftlichen Ansprüche an das Erscheinungsbild und die körperliche Perfektion von Menschen weiter.

Künstliche Nanostrukturen können z. B. durch Emissionen der Nanoindustrie oder durch Entstehung von Nanopartikeln beim alltäglichen Gebrauch von Nanoprodukten in die Umwelt gelangen. Ihr Ausbreitungsverhalten und ihre Auswirkungen auf die Umwelt, insbesondere potenzielle Langzeitfolgen, sind bisher kaum bekannt. Hier ist insbesondere auf solche Stoffe zu verweisen, die in der natürlichen Umwelt nicht vorkommen, wie Fullerene oder Nanotubes, die als neuartige Materialien einzustufen sind.

Zudem sind unterschiedliche Wirkungen auf die jeweiligen Umweltmedien zu erwarten. In der Luftreinhaltung stützt man sich derzeit auf Aussagen zu ultrafeinen Partikeln, die aus Emissionen des Verkehrs stammen. In Bezug auf Wasser wird von einer hohen Beweglichkeit der Nanopartikel ausgegangen. Abwässer aus Bergwerken beispielsweise enthalten eine vergleichsweise hohe Konzentration an Schwermetallen; Nanopartikel könnten diese Schwermetalle in Fließgewässer verschleppen.

Ethische und gesellschaftliche Aspekte

Bisher wird Nanotechnologie in praktischer Philosophie und Ethik kaum thematisiert, mögliche gesellschaftliche Folgen ihres verstärkten Einsatzes werden eher selten erforscht. In Forschungspolitik und Wissenschaft besteht jedoch Einigkeit darüber, dass mehr Forschungsprojekte, sonstige wissenschaftliche Aktivitäten und forschungspolitische Anstrengungen zu solchen Themen vonnöten sind. Schon jetzt lassen sich einige grundsätzliche Überlegungen zu ethischen Problemen sowie zu möglichen Auswirkungen der Nanotechnologie auf ausgesuchte gesellschaftliche Bereichen anstellen.

In Visionen zur Nanotechnologie tauchen immer wieder Aspekte auf, die die Grenze zwischen dem verwischen, was Menschen sind, und dem, was sie mithilfe technischer Errungenschaften und Anwendungen erschaffen. Solche Aspekte betreffen z. B. die Durchdringung und Veränderung des menschlichen Körpers durch Versuche, seine biologischen Bestandteile durch nanotechnische zu ergänzen bzw. zu ersetzen und ihn mit externen Maschinen oder anderen Körpern bzw. Körperteilen zu vernetzen. Derartige Vorstellungen, aber auch weitere Visionen zur Nanotechnologie, ähneln Visionen zu anderen neuen Technologienentwicklungen oder beziehen sich sogar direkt auf diese. Durch die sich abzeichnende Konvergenz verschiedener Technologien werden nicht nur Hoffnungen auf technische Fortschritte, sondern auch Bedenken in Bezug auf deren Folgen verstärkt. Die weitere Entwicklung der Nanotechnologie sollte daher flankiert werden von kontinuierlicher Forschung zu ethischen und politischen Fragen, die das sich wandelnde Verhältnis von Mensch und Maschine sowie von Natur und Technik betreffen.

Probleme der Verteilung und der gerechten Nutzung der Früchte technischen Fortschritts sind weitere wahrscheinliche gesellschaftliche Folgen des verstärkten Einsatzes von Nanotechnologie. Fragen der Chancenverteilung könnten zumindest in zweierlei Hinsicht dringlich werden: zum einen innerhalb der technisch weit entwickelten Gesellschaften, zum anderen mit Blick auf weniger entwickelte Gesellschaften. Befürchtungen in Bezug auf diese beiden Formen eines möglichen „Nano-divide“ basieren auf der Annahme, dass Nanotechnologie sowohl zu neuen und erweiterten Optionen individueller Selbstbestimmung (z. B. im gesundheitlichen Bereich) als auch zu erheblichen Verbesserungen der Wettbewerbsfähigkeit von Volkswirtschaften beitragen kann. Politische Maßnahmen können Chancengleichheit und eine nachhaltige globale Entwicklung fördern. Weitere politische Aufgaben stellen sich in Bezug auf Schadensvermeidung, z. B. hinsichtlich denkbarer negativer Konsequenzen neuer medizinischer Diagnose- und Überwachungsmöglichkeiten für den Patientendatenschutz.

Ein weiteres Feld, in der durch Nanotechnologie erhebliche Fortschritte erwartet werden, sind militärische Anwendungen. Zudem könnte ein „Nano-divide“ zwischen weit und weniger weit entwickelten Staaten sicherheitspolitisch problematische Folgen nach sich ziehen. Die weitere Entwicklung der Nanotechnologie dürfte daher auch erhöhten sicherheitspolitischen Handlungsbedarf mit sich bringen. Zudem besteht (vor allem – aber nicht nur – in den USA) ein erhebliches Interesse an militärischen Nanotechnologieanwendungen. Obwohl einige der in der wissenschaftlichen Diskussion auftauchenden möglichen Sicherheitsprobleme (wie z. B. durch selbstreplizierende Nanoroboter) wenig dringlich erscheinen, dürften – bei weiteren Fortschritten der nanotechnologischen militärischen Forschung und Entwicklung – Forderungen nach sicherheits- und rüstungskontrollpolitischen Maßnahmen in Zukunft häufiger gestellt werden.

X. Handlungsbedarf

Angesichts der Unsicherheiten sowohl über die mittel- und langfristigen Entwicklungs- und Nutzungsperspektiven der Nanotechnologie als auch über die mit ihrer zunehmenden Anwendung verbundenen Folgen für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt besteht vielfältiger Klärungs- und Handlungsbedarf, auf den in diesem Kapitel im Einzelnen eingegangen wird. Dabei geht es in erster Linie um Anforderungen an staatliches Handeln.

1. Forschung und Entwicklung im Bereich der Nanotechnologie

Bei den Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Nanotechnologie hält Deutschland derzeit eine insgesamt starke, in Teilbereichen eine führende Position. Rang 3 bei den Publikationen und Rang 2 bei den Patentanmeldungen belegen diese positive Einschätzung. Die öffentlichen Fördermittel für die Nanotechnologie sind höher als in allen anderen europäischen Ländern. Über die Mittel, die die Industrie für Forschung und Entwicklung in diesem Bereich einsetzt, liegen keine Zahlen vor.

Diese günstige Position muss behauptet werden. Die Nanotechnologie muss daher in der öffentlichen Forschungsförderung ein prioritärer Bereich bleiben, wie dies in dem programmatischen Stellungnahmen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung auch vorgesehen ist. Kürzungen der Fördermittel in diesem Bereich könnten sich mittel- und langfristig sehr ungünstig auf die Ausschöpfung der wirtschaftlichen Potenziale der Nanotechnologie und damit die internationale Konkurrenzfähigkeit der deutschen Industrie auswirken. Dabei ist auch zu bedenken, dass die Wachstumsraten bei den nanotechnologierelevanten Publikationen und Patentanmeldungen in Deutschland bestenfalls dem internationalen Durchschnitt entsprechen.

Damit Wirtschaft und Gesellschaft von der exzellenten Forschung im Bereich der Nanotechnologie nachhaltig profitieren können, muss sich die öffentliche Forschungsförderung an den konkreten Anwendungsmöglichkeiten der FuE-Ergebnisse orientieren, ohne dass die Grundlagenforschung vernachlässigt wird. Obwohl eine stärkere Anwendungsorientierung ihrer Förderung von Forschung und Entwicklung in der Nanotechnologie ein erklärtes Ziel der Bundesregierung ist (BMBF 2002a), scheinen in dieser Hinsicht noch Defizite zu bestehen. Die realistische Einschätzung des Anwendungspotenzials und des ökonomischen und gesellschaftlichen Nutzens sollte in Zukunft als ein zentrales Beurteilungskriterium für die Förderwürdigkeit von Projekten der Nanotechnologie noch stärker in den Vordergrund gerückt werden.

Start-up-Unternehmen werden bei der Weiterentwicklung der Nanotechnologie und der Umsetzung von FuE-Ergebnissen eine wichtige Rolle zu spielen haben. Mehrere im Rahmen dieses TAB-Projektes zur Praxis der Vergabe von Fördermitteln befragte Experten haben beklagt, dass die oft geforderten Vorleistungen bzw. Vorfinanzierungen von vielen Forschungsgruppen und Start-up-Unternehmen nicht erbracht werden könnten – ein natürlich nicht auf den Bereich der Nanotechnologie beschränktes Problem. Es sollte geprüft werden, durch welche Maßnahmen das auch vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geforderte gründerfreundliche Klima (BMBF 2002a, S. 8) geschaffen werden kann.

Zu den Aufgaben der Kompetenzzentren Nanotechnologie gehört unter anderem die Beratung von Unternehmen. Diese Zentren könnten eine aktivere und erweiterte Rolle bei der Umsetzung von Ergebnissen nanotechnologischer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in den vielfältigen Anwendungsbereichen spielen.

2. Forschung zu Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt

Der Stand der Forschung über die mögliche Gesundheits- und Umweltrelevanz der Nanotechnologie ist unbefriedigend. Vorliegende Untersuchungsergebnisse erscheinen wenig abgesichert, sind zum Teil widersprüchlich und weisen erhebliche Lücken auf. Ein zentrales Problem besteht darin, dass im Gegensatz dazu die Entwicklung nanotechnologischer Verfahren und Produkte relativ schnell voranschreitet. Nach derzeitigem Kenntnisstand gibt es in Deutschland kein Programm, welches potenzielle Umwelt- und Gesundheitswirkungen dieser Aktivitäten systematisch analysiert.

Im Mittelpunkt der Diskussion über mögliche negative Folgen für Gesundheit und Umwelt steht derzeit das Problem der unkontrollierten Freisetzung von Nanopartikeln bei Herstellung und Gebrauch von Nanomaterialien und -produkten. Vermutungen über die Folgen etwa der Inhalation von Nanopartikeln basieren bisher im Wesentlichen auf Analogieschlüssen zu Ergebnissen vorliegender Untersuchungen über die Wirkungen ultrafeiner Partikel. Es stellt sich also grundsätzlich die Frage, inwieweit mit dem Vorstoß in den nanoskaligen Bereich neuartige umwelt- und gesundheitsrelevante Wirkungen verbunden sein könnten, die speziell auf die gezielt veränderten Eigenschaften von Nanomaterialien zurückzuführen sind, welche solche Materialien für Produktions- und Anwendungszwecke gerade interessant machen.

Im Einzelnen fehlt es an Wissen über:

- das Ausbreitungsverhalten von Nanostrukturen, inklusive Nanopartikeln, in allen Medien (insbesondere über den Luftpfad) und potenzielle Langzeitfolgen für Umwelt und Gesundheit, wobei insbesondere auf Stoffe zu verweisen ist, die in der natürlichen Umwelt (bisher) nicht vorkommen, wie Fullerene oder Nanotubes, die als neuartige Materialien einzustufen sind;
- die aktuelle Belastung mit Nanopartikeln in der Umwelt (u. a. Probleme bei der Messung und Quantifizierung von Nanopartikeln und deren Agglomeraten);
- die Pharmakokinetik von Wirkstoffen, die mit Nanopartikeln verabreicht werden;
- den sicheren Umgang mit Nanopartikeln;
- Effekte, die beim „Upscalen“ der Produktion eintreten könnten.

Angesichts dieser Lage sind dringend erheblich verstärkte Forschungsanstrengungen erforderlich, zumal sich aus dem fehlenden Wissen um die Umwelt- und Gesundheitsfolgen von Nanotechnologien Hemmnisse für deren Markteinführung ergeben könnten. Wichtige Forschungsthemen wären in diesem Zusammenhang:

- die Analyse und Spezifizierung der Freisetzungsquellen (Emissionsquellen) von Nanokompositen und Nanopartikeln;

– die Entwicklung von Modellen für das Ausbreitungsverhalten und die Aufnahme von Nanopartikeln sowie deren Transfer in den Blutkreislauf oder in das Gewebe; durch aussagekräftige Modellierungen würde das Verständnis biologischer Prozesse gefördert werden;
– die Erforschung der toxikologischen Eigenschaften von Nanomaterialien, einschließlich der (agglomerierten) Nanopartikel;
– die Analyse der Interaktion von Nanopartikeln mit der menschlichen Physiologie (Durchführung von Toxizitätstests und -studien, Entwicklung von breit und gezielt angelegten Analysen zum Nachweis von Wechselwirkungen im menschlichen Körper);
– die Untersuchung der kurz- und langfristigen Umwelt- und Gesundheitsrisiken von Nanopartikeln;
– die Entwicklung von Methoden und Maßstäben zur Bewertung toxischer Effekte von Nanomaterialien unter konkreten Praxisbedingungen (z. B. am Arbeitsplatz);
– die Untersuchung von Life-Cycle-Aspekten von Nanopartikeln (z. B. Recycling-Problem).

3. Ethische und gesellschaftliche Aspekte

Sieht man von der Debatte über futuristische Schreckensvisionen ab, lässt sich feststellen, dass ethische und gesellschaftliche Aspekte der Nanotechnologie bisher kaum in Wissenschaft und Öffentlichkeit thematisiert wurden. Allerdings sind die Diskussionen zu den Folgen anderer Technologieentwicklungen auch für die Einschätzung der weiteren Entwicklung der Nanotechnologie von Interesse und Relevanz.

So wird zum einen – vor allem hinsichtlich der Informationstechnologie und Biotechnologie – über die Frage diskutiert, wie weit das menschliche Leben und der menschliche Körper technisiert werden können, ohne dass es zu gravierenden Veränderungen humaner Identität kommt. Bei dieser Problematik ginge es hinsichtlich der Nanotechnologie z. B. um künftige Versuche, die biologischen Bestandteile des menschlichen Körpers durch technische zu ergänzen oder zu ersetzen und ihn mit externen Maschinen oder anderen Körpern bzw. Körperteilen zu vernetzen. In einer sehr langfristigen Perspektive erscheint es sogar möglich, dass sich durch die zunehmende Technisierung des menschlichen Körpers neuartige und gravierende Formen von Ungleichheit entwickeln, z. B. zwischen Menschen mit nanotechnologisch stark modifizierten Körpern und Menschen ohne solche Körper.

Fragen sozialer Ungleichheit könnten aber auch kurz- bis mittelfristig für die Debatte über Nanotechnologie relevant werden. Ähnlich wie beim Problem „Digital-divide“, das aus den Diskussionen über gesellschaftliche und ökonomische Folgen der neueren Medienentwicklung bekannt ist, könnte eine sozial unausgewogene Nutzung der Nanotechnologie bestehende soziale Unterschiede verfestigen („Nanodivide“). Von besonderer Relevanz ist hier die Gefahr, dass durch Fortschritte der Nanotechnologieentwicklung Wohlstandsunterschiede zwischen armen und reichen Ländern noch vergrößert werden.

Durch die weitere Entwicklung der Nanotechnologie könnten zudem gewisse Probleme des Datenschutzes sowie des Schutzes der Privatsphäre noch dringlicher werden, die bereits aus den Diskussionen zur Informationstechnologie und zur Biotechnologie bekannt sind. Hier ginge es hinsichtlich der Nanotechnologie z. B. um (in der Forschung bereits anvisierte) zukünftige Anwendungen in der Medizin, die eine frühzeitige Entdeckung von Krankheiten und eine permanente, weit reichende Überwachung menschlicher Körperfunktionen möglich machen könnten. Wenn sich z. B. künftig durch kleine Diagnoseeinheiten – Labs-on-a-Chip – in Einrichtungen des Gesundheitswesens oder zu Hause umfassende persönliche Diagnosen erstellen lassen, kann auf diese Weise potenziell eine große Fülle von besonders schützenswerten Gesundheitsdaten gewonnen werden, einschließlich Daten von prognostischem Wert. Des Weiteren könnten durch nanotechnologische Artefakte die Möglichkeiten der Überwachung menschlicher Aktivitäten sehr verbessert werden, wodurch sich auch erweiterte Missbrauchsmöglichkeiten ergeben würden.

Die derzeitige frühe Phase der Nanotechnologieentwicklung kann als eine Zeit der Weichenstellungen in deren Nutzung und ethischer Einschätzung begriffen werden. Es empfiehlt sich, bereits jetzt Forschung zu den gesellschaftlichen und ethischen Aspekten der Entwicklung und verbreiteten Anwendung der der Nanotechnologie zu initiieren und dabei die Ergebnisse der entsprechenden Untersuchung zu anderen Technologiebereichen zu reflektieren. Frühes Handeln in dieser Richtung kann dazu beitragen, dass mögliche zukünftige Akzeptanzprobleme in einem rationalen Diskurs thematisiert werden.

Verteilungsfragen können in Bezug auf die Nanotechnologie zum derzeitigen Zeitpunkt nur ansatzweise sinnvoll diskutiert und angegangen werden. Hinsichtlich einer möglichen Vergrößerung der Wohlstandsunterschiede zwischen armen und reichen Ländern verdienen aber nanotechnologische Aktivitäten von weniger entwickelten Staaten besonderes Interesse. Durch internationale Forschungs- und Entwicklungszusammenarbeit könnte es erreicht werden, dass Nanotechnologie zum technischen Fortschritt und zur nachhaltigen Entwicklung in den ärmeren Ländern beiträgt.

Fragen des Datenschutzes (insbesondere im medizinischen Bereich) und des Schutzes der Privatsphäre sollten regelmäßig hinsichtlich relevanter nanotechnologischer Neuentwicklungen wissenschaftlich untersucht und öffentlich diskutiert werden. Auch hier ist allerdings die Entwicklung noch nicht so weit vorangeschritten, dass spezifischerer Handlungsbedarf ausgemacht werden könnte.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass mögliche problematische Folgen neuer Technologien durch nanotechnologische Fortschritte noch verschärft werden könnten. Da der genaue Charakter dieser Fortschritte und ihrer

Auswirkungen aber noch nicht klar ist, kommt es derzeit vor allem darauf an, durch Forschung und öffentlichen Diskurs die Basis für eine rationale Auseinandersetzung mit denkbaren Problemen der Zukunft zu schaffen.

4. Information der Öffentlichkeit und Diskurse

National wie international besteht Übereinstimmung darüber, dass die umfassende Information der Öffentlichkeit Voraussetzung einer rationalen gesellschaftlichen Auseinandersetzung mit der Nanotechnologie ist. Die Bundesregierung hat sich dementsprechend im letzten Jahr das Ziel gesetzt, einen gesellschaftlichen Diskurs zwischen Wissenschaft, Unternehmen und der breiten Öffentlichkeit über Chancen, Perspektiven und Risiken der Nanotechnologie zu initiieren. Dadurch sollen Anwendungsfelder mit hohem Marktpotenzial und gesellschaftlichem Nutzen identifiziert werden (BMBF 2002a). Um die Grundlagen für einen solchen Diskurs zu verbessern und zu erweitern, hat das BMBF Untersuchungen zu den wirtschaftlichen Potenzialen der Nanotechnologie, zu den Nachhaltigkeitseffekten durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte und zu den Auswirkungen der Nanotechnologie auf das Gesundheitssystem in Auftrag gegeben. Sie sind derzeit noch in Bearbeitung.

Öffentlichkeitsarbeit gehört auch zum Aufgabenspektrum der Kompetenzzentren Nanotechnologie. Sie sollen nicht nur Unternehmen, sondern auch die breite Öffentlichkeit über Grundlagen der Nanotechnologie und aktuelle Entwicklungen in diesem Bereich informieren. Durch die Organisation von (insbesondere regionalen) Veranstaltungen, Internetauftritte, die Veröffentlichung von Broschüren und andere Aktivitäten können die Kompetenzzentren dieser Aufgabe nachkommen. Ein erklärtes Ziel ist es dabei, Schüler und Studenten für die Naturwissenschaften und insbesondere die Nanotechnologie zu interessieren, um dem abzusehenden Mangel an qualifizierten Fachleuten entgegenzuwirken. Auch Fortbildungsveranstaltungen für Lehrer werden zur Nanotechnologie durchgeführt. Dabei wird jeweils das gesamte Lehrerkollegium angesprochen, also nicht nur Naturwissenschaftler. Ziel ist es, über Lehrer als Multiplikatoren eine breitere Öffentlichkeit über die Chancen der Nanotechnologie für den Menschen zu informieren und auch eine fundierte Diskussion über die möglichen Folgen dieser Technologie zu beginnen.

Die Informationsfunktion der Kompetenzzentren ist ein wichtiges Element der Nanotechnologiepolitik in Deutschland und sollte weiter gefördert und ausgebaut werden. Erstrebenswert ist die Schaffung einer zentralen Informationsstelle für die breite Öffentlichkeit zum Thema Nanotechnologie. So könnte z. B. ein leicht auffindbarer Internetauftritt regelmäßig aktualisierte und thematisch gebündelte Informationen präsentieren, die für die allgemeine Öffentlichkeit von Interesse sind. Dabei ließe sich auf die Informationsangebote der einzelnen Kompetenzzentren und zudem auf andere nationale, europäische und außereuropäische Informationsportale zur Nanotechnologie zurückgreifen. Die Kompetenzzentren könnten so eine Unterstützungsfunktion für den vorgesehenen gesellschaftlichen Diskurs zur Nanotechnologie leisten.

In diesem Zusammenhang erscheint es wichtig, die von Drexler und anderen entwickelten, utopisch anmutenden Langfrist-Visionen zur Nanotechnologie (Kapitel VII.3) kritisch zu überprüfen, die die öffentliche Debatte zur Nanotechnologie bisher stark geprägt haben. Große Teile der interessierten Öffentlichkeit (und der Medien) haben von Nanotechnologie im Kontext dieser Visionen erfahren, was diese politisch – nicht nur forschungspolitisch – relevant macht. Es sollten Studien gefördert werden, die grundlegende Probleme dieser Visionen und Fragen ihrer technischen Umsetzbarkeit untersuchen. Des Weiteren wäre zu überprüfen, in welchem Ausmaß der visionäre Diskurs am und im Umfeld des von Drexler gegründeten Foresight Institute die öffentliche Wahrnehmung von Nanotechnologie geprägt hat und weiterhin beeinflusst. Dies ist auch deshalb angebracht, weil sich an diesem Diskurs auch eine Reihe prominenter Forscher – insbesondere aus dem Bereich der Informationstechnik – beteiligt.

Aus europäischer und deutscher Sicht erscheint es zudem angeraten, auch die stärker durch weniger langfristige Visionen geprägten Debatten zu verfolgen, die im Umfeld der National Nanotechnology Initiative der US-Regierung geführt werden. Sie weisen zwar nur wenige Berührungspunkte mit den visionären Diskussionen am Foresight Institute auf, sind aber zum Teil ebenfalls sehr weit reichend. Hoffnungen wie z. B. auf die Heilung schwerer Krankheiten und Verletzungen oder auf eine erhebliche, weltweite Erhöhung des Wohlstands dürften aufgrund ihres Optimismus die öffentliche Wahrnehmung der Nanotechnologie stark mitbestimmen – insbesondere, wenn sie von der US-Regierung und einer Vielzahl anerkannter Wissenschaftler geäußert werden. Forschungspolitik und Wissenschaft können nicht nur im wissenschaftlichen Diskurs, sondern auch durch Öffentlichkeitsarbeit dazu beitragen, den Bekanntheitsgrad dieser Visionen in Europa zu erhöhen. Ziel könnte es sein, zwar die Faszination, die von realistisch erscheinenden Visionen zur Nanotechnologie ausgeht, zu verdeutlichen, utopisch wirkende Vorstellungen dabei aber kritisch zu beleuchten. Die Auseinandersetzung mit den futuristischen Heils- und Schreckensvisionen sollte ein wichtiger Bestandteil der Öffentlichkeitsarbeit zur Nanotechnologie sein.

5. Ausbildung und Nachwuchsförderung

Grundlagenforschung, angewandte Forschung und Entwicklung im Bereich der Nanotechnologie werden zunehmend interdisziplinär sein müssen, mit entsprechenden Folgen für Ausbildung und Nachwuchsförderung. Neue Organisationsstrukturen und Ausbildungsgänge müssen entstehen, als Voraussetzung für einen Innovations- und Produktivitätsschub.

Eine wichtige Initiative zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses im Bereich der Nanotechnologie in Deutschland ist der vom BMBF im Jahre 2002 gestartete und auf fünf Jahre angelegte Wettbewerb zur Finanzierung interdisziplinärer Nachwuchswissenschaftler-

Gruppen. Ziel dieses Wettbewerbs ist es laut BMBF, die „Durchdringung der beteiligten Grundlagendisziplinen und der Ingenieurwissenschaften so zu fördern, dass neue Impulse für die Fortentwicklung der Nanotechnologie und ihrer Nutzung entstehen“ (BMBF 2002a, S. 11). Dieser Wettbewerb sollte zumindest im ursprünglich geplanten Umfang durchgeführt werden.

In verschiedenen Industrieländern wird intensiv über die bildungspolitischen Herausforderungen diskutiert, die sich aus Fortschritten in der Nanotechnologie und verwandten Technologiebereichen ergeben könnten. So wird in den USA staatlicherseits die Auffassung vertreten, dass durch die Konvergenz verschiedener Technologien ein Disziplinen (der Natur- wie der Humanwissenschaften) übergreifendes, vielfältiges Curriculum benötigt werde. Besondere Bedeutung wird dabei der schulischen Bildung beigemessen. Mit einiger Emphase ist von einem neuen umfassenden, hierarchischen und intellektuellen Paradigma die Rede, durch das die physische Welt von der Nanoebene bis zur kosmischen Ebene verstehbar und eine „neue Renaissance“ eingeleitet werden könne.

Wie die Qualifizierung für Tätigkeiten im Bereich Nanotechnologie konkret aussehen soll, wird von deutschen Fachleuten zum Teil unterschiedlich beurteilt: Die Forderungen reichen von interdisziplinären Nanotechnologie-Schwerpunkten im Rahmen des Hauptstudiums der Universitätsausbildung (in verschiedenen Disziplinen) über die Ansiedlung des Forschungsbereichs in der Physik oder Chemie bis hin zu einer festeren Verankerung der Nanotechnologie in der Ausbildung von Ingenieuren. Übereinstimmung besteht dagegen darin, dass im Rahmen der Ausbildung frühzeitig mit Wirtschaftsunternehmen zusammengearbeitet werden müsse. Weitgehend Einigkeit herrscht gegenwärtig auch darüber, dass zunächst ein Grundstudium in einer der klassischen Disziplinen (wie z. B. Physik oder Chemie) abzuschließen ist, bevor sich Studierende auf den Schwerpunkt Nanotechnologie konzentrieren.

Angesichts der zunehmenden Relevanz ethischer und gesellschaftlicher Aspekte der Nanotechnologie gewinnt zudem in Europa und den USA die Auffassung an Boden, dass Nanotechnologie zu einem wichtigeren Thema in der nicht naturwissenschaftlichen Forschung werden müsse, was wiederum auch Folgen für die Ausbildung des Nachwuchses in diesen Disziplinen haben sollte. Sinnvoll wären verstärkte Bemühungen, sozial- und geisteswissenschaftliche Technikforschung in die entsprechenden Studiengänge zu integrieren. Dabei könnte besonderer Wert auf die vergleichende Auseinandersetzung mit den – gerade auch in ethischer und gesellschaftlicher Hinsicht eng verwandten – relevanten neuen Technologien gelegt werden.

Hinsichtlich bestimmter Berufsgruppen plädiert das BMBF dafür, die inhaltlichen Angebote der Nanotechnologie für die berufliche Aus- und Weiterbildung sowie den Qualifizierungsbedarf vertieft zu untersuchen. Im Rahmen der Arbeit der „Kompetenzzentren Nanotechnologie“ sollen Konzepte in Bezug auf Qualifizierungsfragen weiterentwickelt werden.

6. Militärische Sicherheit

Die Möglichkeit der missbräuchlichen und unkontrollierten Nutzung von Nanotechnologie wird allgemein als Gefahr gesehen. Dabei stehen auch immer wieder militärische Optionen und mögliche Probleme der inneren Sicherheit, die sich aus der weiteren Entwicklung der Technologie ergeben könnten, zur Debatte.

Hinsichtlich der militärischen und sicherheitspolitischen Relevanz der Nanotechnologie ist zu unterscheiden zwischen sehr langfristigen Zukunftsszenarien, die auf den Schreckensvisionen zu selbstreplizierenden, autonom agierenden und destruktiven Nanorobotern basieren, und relativ bald möglich erscheinenden Entwicklungen in der Militärtechnik.

Sollten – wider Erwarten – nanotechnologische Entwicklungen gelingen, die Belege für den Realitätsgehalt der Schreckensvisionen Drexlers und Joys wären, hätte dies gravierende sicherheitspolitische Konsequenzen. Die Frage, ob es sinnvoll ist, schon jetzt denkbare Vorsorge- und Gegenmaßnahmen zu diskutieren, wird von Experten allerdings unterschiedlich beantwortet.

Die Mehrzahl der aktuell diskutierten militärtechnischen Entwicklungen im Bereich Nanotechnologie erscheint hingegen wenig riskant. Es handelt sich vor allem um Neuerungen für defensive Zwecke, wie z. B. neuartigen Rüstungsschutz für Soldaten. Ebenfalls in kurz- bis mittelfristiger Perspektive realistisch erscheinen jedoch z. B. (durch Nano- oder Mikrotechnologie) verbesserte Möglichkeiten der Lagerung, des Transports und des Einsatzes von chemischen und biologischen Waffen. Durch die Verwendung nanotechnologischer Partikel könnten auch – wie bei den in der Forschung bereits anvisierten Drug-Delivery-Systemen – neuartige Detektionsmöglichkeiten von militärischer Bedeutung entstehen.

Ein weiterer aus der Perspektive eines erweiterten Sicherheitsbegriffs relevanter Aspekt ist die zunehmende Asymmetrie zwischen den reichen Industrieländern und den Ländern der Dritten Welt. Erhebliche Investitionen der weit entwickelten Staaten in die nanotechnologische Rüstungsforschung und -entwicklung könnten diese Tendenz verstärken.

Es existieren bereits Ansätze zu einer Diskussion über Rüstungskontrollfragen im Bereich der militärischen Nutzung von Nanotechnologie. Sinnvoll wäre z. B. eine verstärkte internationale Kooperation der verschiedenen Nanotechnologieinitiativen, unter Einbeziehung rüstungskontrollpolitischer Aspekte. Von besonderer Relevanz wäre dabei die Frage, wie sich in Zukunft der Einsatz von Nano- und Mikrotechnologie für Zwecke der biologischen und chemischen Kriegsführung und durch Terroristen verhindern lässt. Sollte die wissenschaftliche Unhaltbarkeit der Visionen Drexlers und Joys nicht bewiesen werden können, müssten weitere, vorsorgliche Maßnahmen durchgeführt werden, wie z. B. das Verbot der Produktion von nanotechnologischen Systemen, die sich in natürlicher Umwelt selbst replizieren können.

7. Regulierungsbedarf

Regulierungen, die sich speziell auf die Nanotechnologie bzw. ihre Anwendungen beziehen, gibt es in Deutschland bisher noch nicht (und sind auch aus anderen Ländern nicht bekannt). Ob nanotechnologiespezifische Regulierungen erforderlich sind oder sein werden oder ob die Anwendung des bestehenden Rechtsrahmens ausreicht, wird unterschiedlich beurteilt. In der beginnenden Debatte zu dieser Frage werden sowohl Gefahrenpotenziale sehr langfristiger, visionärer Entwicklungsmöglichkeiten der Nanotechnologie thematisiert, wobei die Gefahren durch selbstreplizierende Nanoroboter eine besondere Rolle spielen, als auch mögliche Gefährdungen durch bereits realisierte oder kurz- bis mittelfristig zu erwartende nanotechnologische Anwendungen, insbesondere durch die Emission von Nanopartikeln (IÖW 2002; Reynolds 2002; ETC Group 2003a).

Diese Debatte wird sich in dem Maße intensivieren, wie sich der Prozess der Anwendung der Nanotechnologie beschleunigt. Politische Entscheidungen zur Regulierung und Aufsicht im Bereich der Nanotechnologie und ihrer Anwendungen werden notwendig werden. Für solche Entscheidungen müssen die sachlichen Grundlagen geschaffen werden. Hierzu gehört – neben einer wesentlich verbesserten Datenbasis zu den Auswirkungen nanotechnologischer Verfahren und Produkte auf Umwelt und menschliche Gesundheit – eine systematische und umfassende Analyse des derzeitigen für Anwendungen der Nanotechnologie relevanten Rechtsrahmens.[54] Im Vordergrund sollten dabei zunächst die aktuellen und realistischerweise zu erwartenden nanotechnologischen Anwendungen stehen.

Damit kommen in erster Linie die folgenden Gesetze (mit den entsprechenden Verordnungen) in den Blick:

- das Bundesimmissionsschutzgesetz,
- das Chemikaliengesetz,
- das Arbeitsschutzgesetz,
- das Arzneimittelgesetz,
- das Medizinproduktegesetz,
- das Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetz,
- die Novel-Food-Verordnung (EG).

[54] Nach einer Mitteilung der Britischen Botschaft in Berlin vom 10. Juli 2003 werden die Royal Society und die Royal Academy of Engineering im Auftrag der britischen Regierung eine umfassende Studie zur Nanotechnologie durchführen, in der auch geprüft werden soll, ob gesetzgeberischer Handlungsbedarf im Hinblick auf die Nanotechnologie besteht (Britische Botschaft 2003).

Sie bilden die Rechtsgrundlage für das vielfältige Instrumentarium, das dem Staat im Prinzip zur Verfügung steht, um Mensch und Umwelt vor schädigenden Auswirkungen von Nanoprodukten zu schützen. Einzelheiten enthält die folgende Tabelle.

Im Rahmen der geforderten Überprüfung des für Anwendungen der Nanotechnologie relevanten Rechtsrahmens wären Fragen wie die folgenden zu stellen:

- Fließen Überlegungen zu spezifischen Risiken von Nanoprodukten in ausreichendem Maße in das Zulassungsverfahren für neue Arzneimittel ein?
- Sind bei Medizinprodukten (Instrumente, Apparate, Stoffe usw.) neue Verfahren für Nanoprodukte notwendig, oder genügen die bestehenden Konformitäts- und (Selbst-)Zertifizierungsverfahren?
- Lebensmittel, die ganz oder teilweise nanotechnologisch hergestellt wurden, können in den Geltungsbereich der Novel-Food-Verordnung fallen. Sind solche Lebensmittel den vorhandenen im Wesentlichen gleichwertig (sodass eine Notifizierung bei der EU-Kommission genügt)?
- Werden die zahlreichen Regelungen zum Schutz der Verbraucher vor gesundheitsgefährdenden Kosmetika so effektiv umgesetzt, dass ein ausreichender Schutz bei der Verwendung nanotechnologischer Kosmetika erreicht wird?
- Die Grenzwerte für Feinstaub werden in Gewichtseinheiten gemessen. Ist dies für Nanopartikel sinnvoll, deren schädliche Auswirkungen auf die menschlichen Atemwege stärker vom Partikelvolumen und von der Partikeloberfläche als von der Masse abhängig sind? Inwieweit macht die Existenz von Nanopartikeln eine weitere Differenzierung der Immissionsgrenzwerte der BImSchV 22 erforderlich?

In Anbetracht der bestehenden Unsicherheiten über die (positiven wie negativen) Auswirkungen der Nanotechnologie und über die Notwendigkeit nanotechnologiespezifischer Regulierungen sollte erwogen werden, den weiteren Anwendungsprozess dieser Technologie durch ein systematisches entscheidungsunterstützendes Monitoringprogramm zu begleiten. Dieses Programm hätte beispielsweise die Aufgabe, Hinweise auf biomedizinische, ökologische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Folgen regelmäßig zu erheben und zu evaluieren, Forschungsprojekte anzuregen, um offene Fragen – etwa zu toxikologischen Effekten – zu klären, die gesellschaftliche Wahrnehmung der Nanotechnologie bzw. ihrer verschiedenen Anwendungen zu verfolgen und gegebenenfalls Hinweise auf erforderlich werdende Modifikationen des relevanten Rechtsrahmens zu geben.

Tabelle 17

Regelungsmöglichkeiten im Überblick (Auswahl)

Nanoprodukt	Überprüfung der Sicherheit durch
Arzneimittel	Zulassungsprüfung
Medizinprodukte	keine staatliche Zulassungsprüfung Konformitätsverfahren (CE-Kennzeichnung) Selbstzertifizierung (bei Medizinprodukten mit geringem Risiko)
Lebensmittel	Möglichkeiten der Behörden: – Erlass von Anforderungen an die Herstellung – Einführen einer Genehmigungs- oder Anzeigepflicht für das Herstellen, Behandeln oder Inverkehrbringen – Pflicht zur Anbringung von Warnhinweisen und Sicherheitsvorkehrungen – Verbote
Novel Food	Zulassungsprüfung für neuartige Lebensmittel Notifizierung für Lebensmittel, die im Wesentlichen den vorhandenen gleichwertig sind
Kosmetika	Möglichkeiten der Behörden: – Erlass von Anforderungen an die mikrobiologische Beschaffenheit – Einführen einer Genehmigungs- oder Anzeigepflicht für das Herstellen, Behandeln oder Inverkehrbringen – Einführen von Fähigkeitsnachweisen als Voraussetzung für das Ausüben gewisser Tätigkeiten im Kosmetikbereich
Luftverunreinigungen	Grenzwerte gemäß BImSchG/BImSchV 22
Gefährdungen am Arbeitsplatz	Arbeitssicherheitsvorschriften
gefährliche Stoffe	Anmelden von Stoffen technische Regeln im Umgang mit gefährlichen Stoffen

Quelle: Basler & Hofmann 2002, S. 118

8. Zusammenfassung

Die Voraussetzungen für die erfolgreiche Weiterentwicklung der Nanotechnologie und die breite wirtschaftliche und gesellschaftliche Nutzung ihrer Potenziale müssen geschaffen bzw. verbessert werden. Hieraus resultiert vielfältiger Klärungs- und Handlungsbedarf. Da sich die Nanotechnologie – insgesamt gesehen – noch in einem relativ frühen Stadium der Entwicklung befindet, kommt den Anforderungen an staatliches Handeln besondere Bedeutung zu.

Die Nanotechnologie muss in der öffentlichen Forschungsförderung ein prioritärer Bereich bleiben, damit die deutsche Forschung ihre derzeit starke internationale Position im Bereich der Nanotechnologie behaupten kann. Das Anwendungspotenzial und der ökonomische und gesellschaftliche Nutzen sollten als Beurteilungskriterien für öffentliche Förderung stärkeres Gewicht erhalten. Die Kompetenzzentren Nanotechnologie könnten eine aktivere und erweiterte Rolle bei der Umsetzung von Ergebnissen nanotechnologischer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten spielen.

Der Stand der Forschung über die potenziellen Umwelt- und Gesundheitswirkungen der Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Verfahren und Produkte ist unbefriedigend. Erhebliche verstärkte Forschungsanstrengungen sind hier dringend erforderlich, da sich aus dem fehlenden Wissen um die Umwelt- und Gesundheitsfolgen Hemmnisse für die Markteinführung von Nanotechnologien ergeben könnten.

Forschung zu gesellschaftlichen und ethischen Aspekten der Entwicklung und verbreiteten Anwendung der Nanotechnologie sollte bereits jetzt initiiert werden. Fragen des Datenschutzes (insbesondere im medizinischen Bereich) und des Schutzes der Privatsphäre sollten regelmäßig hinsichtlich relevanter nanotechnologischer Neuentwicklungen wissenschaftlich untersucht und öffentlich diskutiert werden.

Die umfassende Information der Öffentlichkeit ist Voraussetzung einer rationalen gesellschaftlichen Auseinandersetzung mit der Nanotechnologie. Anzustreben wäre die Schaffung einer zentralen Informationsstelle für die breite Öffentlichkeit zum Thema Nanotechnologie. Dabei

könnte auf die Informationsangebote der einzelnen Kompetenzzentren und auf andere nationale, europäische und außereuropäische Informationsportale zurückgegriffen werden.

Aus den Fortschritten in der Nanotechnologie – und aus der zunehmenden Konvergenz verschiedener Technologie- und Forschungsbereiche – entstehen neue Anforderungen an die Bildungspolitik. Interdisziplinäre Ansätze in Ausbildung und Nachwuchsförderung in der Nanotechnologie und verwandten Technologiebereichen müssen kontinuierlich und verstärkt gefördert werden. Sozial- und geisteswissenschaftliche Technikforschung sollte dabei mehr als bisher einbezogen werden. Der nanotechnologische Qualifizierungsbedarf verschiedener Berufsgruppen ist vertieft zu untersuchen und gegebenenfalls durch geeignete Qualifizierungsangebote abzudecken.

Politische Entscheidungen über die Notwendigkeit nanotechnologiespezifischer Regulierungen werden in absehbarer Zeit getroffen werden müssen. Für solche Entscheidungen sind die sachlichen Grundlagen zu schaffen. Dazu gehört – neben einer wesentlich verbesserten Datenbasis zu den Auswirkungen nanotechnologischer Verfahren und Produkte auf Umwelt und menschliche Gesundheit – eine systematische und umfassende Analyse des derzeitigen für Anwendungen der Nanotechnologie relevanten Rechtsrahmens. Die Einrichtung eines den weiteren Anwendungsprozess der Nanotechnologie begleitenden entscheidungsunterstützenden Monitoringprogramms sollte erwogen werden.

Literatur

1. In Auftrag gegebene Gutachten

BASLER & HOFMANN AG (2002): Nanotechnologie und Life Sciences (Autoren: Eckardt, A., Ziegler, C. M.). Zürich

FHG-INT (Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen) (2003): Anwendungspotenziale nanotechnologiebasierter Materialien (Autoren: Grüne, M., Kernchen, R., Kohlhoff, J., Kretschmer, T., Luther, W., Neupert, U., Notthoff, C., Reschke, S., Wessel, H., Zach, H.-G.); in Kooperation mit dem VDI-TZ-ZTC (Verein Deutscher Ingenieure e.V. – Technologiezentrum – Zukünftige Technologien Consulting). Euskirchen/Düsseldorf

FHG-ISI (Fraunhofer-Institut Systemtechnik und Innovationsforschung) (2002a): Nanotechnologie im Bereich der Informations- und Kommunikationstechniken (Autoren: Friedewald, M., Rothhaas, A., Jaeckel, G.). Karlsruhe

FHG-ISI (Fraunhofer-Institut Systemtechnik und Innovationsforschung) (2002b): Anwendungspotenziale der Nanotechnologie im Bereich der Informations- und Kommunikationstechniken (Autor: Friedewald, M.). Karlsruhe

FHG-ISI (Fraunhofer-Institut Systemtechnik und Innovationsforschung) (2003): Nanotechnologie und Life Sciences (Autoren: Hinze, S., Gaisser, S.). Karlsruhe

IÖW (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH) (2002): Anwendungspotenziale nanotechnologiebasierter Materialien – Analyse ökologischer, sozialer und rechtlicher Aspekte. (Autoren: Steinfeldt, M., Petschow, U., Hirschl, B.). Berlin

VDI/FHG-INT (Verein Deutscher Ingenieure e. V. – Technologiezentrum – Zukünftige Technologien Consulting [VDI-TZ-ZTC]/Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen) (2002): Nanotechnologie – Teilstudie Wissenschaftlich-technische Grundlagen (Autoren: Grüne, M., Kretschmer, T., Luther, W., Malanowski, N., Reschke, S., Wessel, H., Wevers, M., Zweck, A.). Düsseldorf/Euskirchen

2. Zitierte Literatur

3i (2002): Nanotechnology – Size matters. A 3i white paper in association with the Economist Intelligence Unit and the Institute of Nanotechnology (10. Juli 2002)

3sat (2000): Biologische Tarnkappen – Implantate zur Reparatur im Gehirn. Text zur Sendung vom 1. Februar 2002. (http://www.3sat.de/3satframe.php3?url = http://www.3sat.de/nano/cstuecke/28612/; abgerufen am 23. August 2002)

ABBEY, D. E. et al. (1999): Long-term inhalable Particles and other Air Pollutants related to Mortality in Nonsmokers. In: Am. J. Respir. Crit. Care Med. 159, S. 373–382

ADLEMAN, L. M. (1994): Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems. In: Science 266, S. 1021–1023

ADLEMAN, L. M. (1996): On Constructing a Molecular Computer. In: DISMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science 27, S. 1–21

ADLEMAN, L. M. (1998): Rechnen mit DNA. In: Spektrum der Wissenschaft 11, S. 70–77

AE (Access Excellence at the National Health Museum) (2003): http://www.accessexcellence.org/AB/GG/dna2.html (abgerufen am 28. April 2003)

AGILENT (2001): Agilent Technologies and Caliper offer new RNA 6000 Nano Lab Chip Kit for Quality Control and Quantification of total and messenger RNA. (http://www.agilent.com/about/newsroom/presrel/2001/08aug2001a.html; abgerufen am 31. Juli 2002)

AHLSKOG, M., HAKONEN, P., PAALANEN, M. et al. (2001): Multiwalled Carbon Nanotubes as Building Blocks in Nanoelectronics. In: Journal of Low Temperature Physics 124(1/2), S. 335–352

AIF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke" e.V.) (o. J.): http://www.aif.de/de/presse-lounge/pi_048.htm

ALBERTS, B. et al. (2002): Molecular Biology of the Cell. New York

ALTMANN, J., GUBRUD, M. A. (2002): Risks from Military Uses of Nanotechnology – The Need for Technology Assessment and Preventive Control. In: Roco, M. C., Tomellini, R. (Hg.): Nanotechnology – Revolutionary Opportunities and Social Implications. Luxembourg, S. 144–148

ALTMEYER, S., HOFMANN, K., KÖSTER, T. (1999): Schalten mit einzelnen Elektronen: Coulomb Blockade für die Bauelemente des 21. Jahrhunderts. In: RWTH Themen 1/1999, S. 31–34

ANSELL, R. J., KRIZ, D., MOSBACH, K. (1996): Molecularly Imprinted Polymers for Bioanalysis: Chromatography, Binding Assays, and Biomimetic Sensors. In: Current Opinion in Biotechnology 7, S. 89–94

ANSELMANN, R. (2001): Journal of Nanoparticle Research 3, S. 329–336

ANSELMANN, R. (2002): In: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung. Drittes Fachforum Nanotechnologie, OTTI-Kolleg, 22./23. Oktober 2002, Regensburg

ARNALL, A. H. (2003): Future Technologies, Today's Choices. Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; A technical, political and institutional map of emerging technologies. A report for the Greenpeace Environmental Trust, London

ASCHENBRENNER, N. (2002): Chemieanlage aus Silizium. In: Spektrum der Wissenschaft 10

ASHER, S. (2001): Institute for Soldier Nanotechnologies. Workshop on Nanoscience for the Soldier, 8./9. Februar 2001. (http://www.aro.army.mil/phys/Nanoscience/section3.htm)

ASKELAND, D. R. (1996): Materialwissenschaften. Heidelberg

AVIRAM, A. (1988): Molecules for Memory, Logic, and Amplification. In: Journal of the American Chemical Society 110, S. 5687–5692

BACHMANN, G. (1998): Innovationsschub aus dem Nanokosmos – Technologieanalyse. VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, Abteilung Zukünftige Technologien, Düsseldorf

BACHMANN, G. (2001): http://www.kompetenznetze.de/inhaltnf_el_c2_s1_z3_g7_ t2_t2.htm

BARTHLOTT, W., NEINHUIS, C. (2001): Der Lotus-Effekt: Selbstreinigende Oberflächen nach dem Vorbild der Natur. In: International Textile Bulletin 1

BASAK, J., MITRA, D., SINHA, S. (2003): Carbon Nanotubes (CNTs): The Next Generation Sensors. Final Project Report MAE 284, University of California, Los Angeles (http://boiling.seas.ucla.edu/shashank/cool_stuff/nanotube.pdf)

BASICS (2002): Nanotechnologie in der Medizin. Resultate des Technology Forecasting. Bericht zuhanden der Begleitgruppe im Rahmen einer Studie im Auftrag des Zentrums für Technologiefolgen-Abschätzung (Veröffentlichung des Schlussberichts im Jahr 2003). Bern/Zürich

BAUMELER, C. (2002): Die Geburt des Cyborg. In: Bulletin ETH Zürich Nr. 286

BAUSTOFF-TECHNIK (2001): Heft 4, S. 142 f.

BBSRC (Biotechnology and Biology Sciences Research Council) (2002a): Biological Aspects of Nanotechnology. Meeting held on 9 May 2002 at the Royal Institution, London, Executive Summary (http://www.bbsrc.ac.uk/science/areas/ebs/reports/ban_workshop.html)

BBSRC (Biotechnology and Biology Sciences Research Council) (2002b): Biological Aspects of Nanotechnology. (http://www.bbsrc.ac.uk/science/areas/ebs/priorities/nao.html)

BCC (Business Communications Company) (1999): Membrane & Seperation Technology News. Pressemitteilung vom 19. September 1999

BEAVER, D. (1996): A universal molecular computer. In: Lipton, R. J.; Baum, E. B. (Hg.): DNA Based Computers. American Mathematical Society, DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science 27, Providence, RI, S. 29–36

BENENSON, Y., PAZ-ELIZUR, T., ADAR, R. et al. (2001): Programmable and autonomous computing machine made of biomolecules. In: Nature 414, S. 430

BERLINER ZEITUNG (2003a): DNA-Chips. In: Berliner Zeitung vom 17. Februar 2003

BERLINER ZEITUNG (2003b): Nano-BioMoleküle in der Diabetes-Behandlung. In: Berliner Zeitung vom 17. März 2003

BERLINER ZEITUNG (2003c): Nanotechnologie – Gut organisierte Zwerge. In: Berliner Zeitung vom 28. Januar 2003

BERNSTEIN, A. et al. (2001): Analysis of the Interface between Bone and Biomaterial. In: Bischoff, G., Hein, H.-J. (Hg.): Micro- and Nanostructures of biological Systems. Aachen

BESENBACHER, F. et al. (1998): Design of a Surface Alloy Catalyst for Steam Reforming. In: Science 279, S. 1913–1915

BILD DER WISSENSCHAFT (2002): Heiligs Blechle – Nanotechnologie. Heft 9

BINNIG, G., ROHRER, H. (2003): Das Rastertunnelmikroskop. (http://www.deutsches-museum.de/ausstell/meister/rtm.htm; abgerufen am 28. April 2003)

BIRGE, R. R. (1990): Photophysics and molecular electronic applications of the rhodopsins. In: Annual Review of Physical Chemistry 41, S. 683–733

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (1999): Bekanntmachung von Richtlinien über die Förderung von Forschungs und Entwicklungsvorhaben im Rahmen des Förderschwerpunktes „Nanotechnologie“. (http://www.vdi.de/vdi/organisation/schnellauswahl/techno/arbeitsgebiete/fue/physik/02055/index. php?param=physik)

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2000): Förderrichtlinie zur Fördermaßnahme „Nanobiotechnologie“. (http://www.nanonet.de/foerderung/index…o&a=Foerderung&b=Nanobiologie&nav=nav3)

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2001): Neues Förderprogramm Nanobiotechnologie. Pressemitteilung Nr. 97 vom 26. Juni 2001. (http://www.bmbf.de/presse01/412.html)

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2002a): Strategische Neuausrichtung: Nanotechnologie in Deutschland. Bonn

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2002b): Standortbestimmung: Nanotechnologie in Deutschland. Bonn

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2002c): Förderrichtlinien für den BMBF-Nachwuchswettbewerb Nanotechnologie. Bekanntmachung vom 6. Mai 2002. (http://www.bmbf.de/677_4345.html)

BOHN, J., COROAMA, V., LANGHEINRICH, M. et al. (2003): Allgegenwart und Verschwinden des Computers: Leben in einer Welt smarter Alltagsdinge. In: Grötker, R. (Hg.): Privat! Kontrollierte Freiheit in einer vernetzten Welt. Hannover

BÖLTAU, M. (1999): Technologieanalyse Quanteninformationstechniken. VDI-Technologiezentrum, Schriftenreihe Zukünftige Technologien Nr. 30, Düsseldorf

BONARD, J.-M., KIND, H., STÖCKLI, T., NILSSON, L.-O. (2001): Field emission from carbon nanotubes: the first five years. In: Solid State Electronics 45, S. 893–914

BOND, P. J. (2002): Converging Technologies and Competitiveness. In: Roco, M.C., Bainbridge, W. S: (Hg.): Converging Technologies for Improving Human Performance. S. 28–30

BORM, P. (2002a): Munich Workshop on Evaluation of Fiber and Particle Toxicity: An Introduction. In: Inhalation Toxicology 14(1)

BORM, P. (2002b): Institut für Umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Experteninterview von Frau Dr. A. Eckardt (Basler & Hofmann AG) am 10. Oktober 2002

BORRMANN, N. (2001): Frankenstein und die Zukunft des künstlichen Menschen. Kreuzlingen/München

BÖTTCHER, H. (2001): Sol-Gel-Beschichtungen auf Textilien – Möglichkeiten und Probleme. In: Textilveredelung 36(3/4)

BÖTTCHER, H. (2002): In: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung. Drittes Fachforum Nanotechnologie, OTTI-Kolleg, 22./23. Oktober 2002, Regensburg

BRIAN, C. H., STEELE, B. C., HEINZEL, A. (2001): Materials for fuel-cell technologies. In: Nature 414, S. 345–352

BRIEL, A. (2002): The Application of Polymer Nanoparticles in Pharmaceutics. An Example: Ultrasound Theranostics, in Book of Abstracts, Chemical Nanotechnology Talks III. Mannheim

BRITISCHE BOTSCHAFT (2003): Britische Notizen/Forschung und Technologie: 90 Mio. Pfund für neue Nanotechnologie-Initiativen in Großbritannien. F/T 14/03

BRÜGGEMANN, O. (2001): Catalytically Active Polymers Obtained by Molecular Imprinting and Their Application in Chemical Reaction Engineering. In: Biomolecular Engineering 18, S. 1–7

BRÜNING, R. (2002): Nano-Krebstherapie. Text zur Sendung des WDR vom 6. August 2002 (http://www.quarks.de/dyn/3999.html; abgerufen am 18. August 2002)

BUCHMANN, S. (2001): Main Cosmetic Vehicles. In: Barel, A. O. et al. (Hg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology. New York

BÜHRER, S., BIERHALS, R., HEINZE, T. et al. (2002): Die Kompetenzzentren der Nanotechnologie in der Frühphase der Bundesförderung. Endbericht der begleitenden Evaluation, ISI/Mundi Consulting, Karlsruhe/Siegen

BUNYK, P., LIKHAREV, K. K., ZINOVIEV, D. (2001): RSFQ Technology: Physics and Devices. In: International Journal of High Speed Electronics and Systems 11(1), S. 257–305

BURNELL, S. R. (2002): NSF Event paints broad Nanotech Picture. United Press International (http://www.upi.com/print.cfm?StoryID=19032002-040320-2972r; abgerufen am 31. Juli 2002)

CALUDE, C. S., PAUN, G. (2001): Computing with Cells and Atoms: An Introduction to Quantum, DNA and Membrane Computing. London/New York

CAPAROL (o. J.): http://www.caparol.de

CATALDO, A. (1999): Japanese play catch-up on magnetic RAMs. In: EE Times, 30. April 1999 (http://www.eetimes.com/semi/news/OEG19990430S0005)

CAULLER, L., PENZ, A. (2002): Artificial Brains and Natural Intelligence. In: Roco, M. C., Bainbridge, W. S. (Hg.): Converging Technologies for Improving Human Performance. S. 227–230

CHARISIUS, H. (2000): Sich selbst montierende Biomoleküle in toter Materie. (http://www.nanogate.de/datenbank/technologie_news/news026.htm; abgerufen am 13. September 2002)

CHARITE (2003): Pressemitteilung vom 12. Juni 2003 (http://www.charite.de/presse/de/archive/meldungen 03_21.html)

CHAUDHARI, P. (2001): Future Implications of Nanoscale Science and Technology: Wired Humans, Quantum Legos, and an Ocean of Information. In: Roco, M. C., Bainbridge, W. S. (Hg.): Societal implications of nanoscience and nanotechnology. NSET workshop report, National Science Foundation, Arlington, S. 75–79

CHEMICAL INSTITUTE OF CANADA (1999): The role of university research in catalysis innovation. In: Canadian Chemical News 7(4), S. 16

CHEN, C., CURLISS, D. (2001): „Resin Matix Composites: Organoclay-Aerospace Epoxy nanocomposites, Part II“. In: SAMPE Journal 09/10, S. 11–18

CHO, Y.-R., LEE, J. H., SONG, Y.-H. et al. (2001): Photolithography-based carbon nanotubes patterning for field emission displays. In: Material Science and Engineering 79, S. 128–132

CHUNG, D. D. L. (2001a): In: Carbon 9, S. 1119–1125

CHUNG, D. D. L. (2001b): In: Composites b 31, S. 511–526

COLE, T., LUSTH J. C. (2001): Quantum-dot Cellular Automata. In: Progress in Quantum Electronics 25, S. 165–189

COLLINS, G. P. (2001): Visionäre des Nanokosmos. In: Spektrum der Wissenschaft Spezial 2 (Nanotechnologie), S. 76–82

COLLINS, G. P., AVOURIS, P. (2001): Elektronik, atomar neu gestrickt. In: Spektrum der Wissenschaft Spezial 2 (Nanotechnologie), S. 48–55

COMPANÓ, R., MOLENKAMP, L., PAUL, D. J. (Hg.) (2000): Technology Roadmap for Nanoelectronics. European Commission IST programme, Future and Emerging Technologies. Microelectronics Advanced Research Initiative, Bruxelles

COOPER, J., MOLLOY, J., RYAN, J. (2001): Nanotechnology: Scientists get together to think small. Business

the quarterly magazine of the Biotechnology and Biological Sciences Research Council, October (http://www.bbsrc.ac.uk/news/features/01oct/01_10_nano.html)

CRAIGHEAD, H. G., JAMES, C. D., TURNER, A. M. P. (2001): Chemical and topographical patterning for directed cell attachment. In: Curr. Opin. Solid State Met. Sci 5, S. 177–184

CREMER, C., EICHHAMMER, W., FRIEDEWALD, M. et al. (2003): Der Einfluss moderner Gerätegenerationen der Informations- und Kommunikationstechnik auf den Energieverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2010 – Möglichkeiten zur Erhöhung der Energieeffizienz und zur Energieeinsparung in diesen Bereichen. Bericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, ISI, Karlsruhe

CUI, J. B., BURGHARD, M., KERN, K. (2002): Room Temperature Single Electron Transistor by Local Chemical Modification of Carbon Nanotubes. In: Nano Letters 2(2), S. 1117–1120

CUTTOR (1999): http://www.kompetenznetze.de/inhaltnf_el_c2_s1_z3_g7_t2_t2.htm

DAIMLERCHRYSLER (Hg.) (2002): Hallo, wach? Die Ermüdung des Fahrers rechtzeitig und zuverlässig erkennen. In: Hightech Report 2, S. 56–57

DATAQUEST (2003): http://bankgesellschaft.de/vowi/11_bln_bbg/04_vergl/04_kompetenz/be_br_produktion.pdf

DAVIES, N., GELLERSEN, H.-W. (2002): Beyond Prototypes: Challenges in Deploying Ubiquitous Systems. In: Pervasive Computing 1(1), S. 26–35

DEGUSSA (o. J.): Current Research Projects at Degussa. Firmenprospekt

DEUTSCH, D. (1985): Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. In: Proceedings of the Royal Society of London A 400, S. 97–117

DEUTSCH, E. (1999): Medizinrecht – Arztrecht, Arzneimittelrecht und Medizinproduktrecht. Berlin u. a.O.

DG BANK/GZ BANK (2001): Im Fokus. Nanotechnologie in der Chemie. Frankfurt a. M.

DIABATÉ, S. (2003): Persönliche Mitteilung vom 10. April 2003, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Toxikologie und Genetik (ITG)

DIERKES, M., HOFFMANN, U., MARZ, L. (1996): Visions of technology. Social and institutional factors shaping the development of new technologies. Frankfurt/New York

DIERS, J. R., DEARMOND, M. K., GUAY, J. et al. (1994): The ESR Characterization of Oligomeric Thiophene Materials. In: Chemical Materials 6, S. 327–332

DOHERTY, L., WARNEKE, B. A., BOSER, B. E., PISTER, K. S. J. (2001): Energy and Performance Considerations for Smart Dust. In: International Journal of Parallel Distributed Systems and Networks 4(3), S. 121–133

DONNER, S. (2002): Ein Biomagnet als Datenspeicher. In: Neue Zürcher Zeitung vom 21. August 2002

DREXLER, K. E. (1986): Engines of Creation – The Coming Era of Nanotechnology. Oxford

DREXLER, K. E. (1999): Building molecular machine systems. In: Trends in Biotechnology 17, S. 5–7

DREXLER, K. E., PETERSON, C. (1991): Experiment Zukunft – Die Nanotechnologische Revolution. (Deutsche Ausgabe 1994) Bonn

DREXLER, K. E., PETERSON, C., PERGAMIT, G. (1991): Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution. (http://www.foresight.org/UTF/download/unb_doc.zip; abgerufen am 28. April 2003)

DUCATEL, K., BOGDANOWICZ, M., SCAPOLO, F. et al. (2001): Scenarios for Ambient Intelligence in 2010. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS). Sevilla

DUDA, A. (2001): In: Das Architekten-Magazin 7/8, S. 40 ff.

DUPARRÉ, A. (2002): In: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung. Drittes Fachforum Nanotechnologie, OTTI-Kolleg, 22./23. Oktober 2002, Regensburg

EARLYBIRD (2002): Hemoteq secures long-term growth with second round financing. Pressemitteilung vom 6. Februar 2002 (http://www.earlybird.com/en/press/portfolio/149/; abgerufen am 19. August 2002)

EGELHAAF S. U., SCHURTENBERGER P. (2003): Time-resolved small-angle neutron scattering of a micelle-to-vesicle transition. (http://www.ill.fr/AR-96/pages/10soft.htm; abgerufen am 28. April 2003)

EICKHOFF, A., SCHEPPAT, B. (2000): Gore-Tex Workwear anti-static – Eine neue Generation von Schutzkleidung. Konferenz-Einzelbericht AVANTEX – Internationales Symposium für Hochtechnologie-Bekleidungstextilien und Fashion-Engineering mit begleitendem Innovationsforum, 27. bis 29. November 2000, Frankfurt a. M.

EICKMANN, T., SEITZ, H. (2002): Klein, aber oho! Von der zunehmenden Bedeutung der Feinstäube. In: Umweltmed. Forsch. Prax. 7(2), S. 63–65

EIGLER, D. M., SCHWEIZER, E. K. (1990): Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. In: Nature 344, S. 524–526 (http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/library.html; abgerufen am 28. April 2003)

ELECTRONICCAST (2003): http://bankgesellschaft.de/vowi/11_bln_bbg/04_vergl/04_kompetenz/be_br_produktion.pdf

ELEKTRONIK (2002): Nanotechnologie: Dünne Schichten mit vielfältigen Funktionen. In: Sonderheft Automotive 02 unter der Rubrik „Notizen“

ELLENBOGEN, J. C., LOVE, J. C. (2000): Architectures for Molecular Electronic Computers. 1. Logic Structures and an Adder Built from Molecular Electronic Diodes. In: Proceedings of the IEEE 88(3), S. 386–426

ESTRIN, D., CULLER, D., PISTER, K., SUKHATME, G. (2002): Connecting the physical world with pervasive networks. In: IEEE Pervasive Computing 1(1), S. 59–69

ETC GROUP (action group on erosion, technology and concentration) (2003a): No Small Matter II: The Case for a Global Moratorium: Size Matters! Occasional Paper Series 7(1), 4/2003 (http://www.etcgroup.org/documents/Occ.Paper_Nanosafety.pdf)

ETC GROUP (action group on erosion, technology and concentration) (2003b): Nanotech Un-gooded! Is the Grey/Green Goo Brouhaha the Industry's Second Blunder? Communiqué, 7–8/2003 (http://www.etcgroup.org/article.asp?newsid=399)

EU-Kommission (2000): Weißbuch zur Lebensmittelsicherheit. Brüssel

EUROPEAN COMMISSION (2002): Nanoscience and Nanotechnology in the Research Programmes of the European Community. (http://www.cordis.lu/nanotechnology/src/era.htm)

FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung) (2002a): Kunststoff mit Algen verbessert. In: FAZ vom 2. Januar 2002

FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung) (2002b): Röntgen mit Nanoröhrchen. In: FAZ vom 9. Juli 2002

FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung) (2002c): Grenzenlose Lichtmikroskopie. In: FAZ vom 21. August 2002

FEYNMAN, R. P. (1959): Vortrag gehalten am 29. Dezember 1959 auf der Jahrestagung der American Physical Society am California Institute of Technology, Pasadena (http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html; abgerufen am 28. April 2003)

FEYNMAN, R. P. (1982): Simulating physics with computers. In: International Journal of Theoretical Physics 21, S. 467–488

FHG-IAF (2002): Nanotechnologie in der Halbleiterphysik sowie deren Anwendung in der Elektronik und Optoelektronik. Technologiestudie für das Fraunhofer-INT, Euskirchen

FHG-ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme) (2002): Anwendungen nanostrukturierter Materialien in der Gebäudetechnik. Freiburg

FHG-ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme) (o. J.): http://www.ise.fhg.de

FHG-ISST (1999): Nanotechnologie im Forschungszentrum Rossendorf: Schwermetallfilter und Optokoppler. (http://www.isst.fhg.de/info@polis/nr96/Nanotechnik.html)

FREUND, B., NIEDERMEIER, W. (1999): Nano-Structure Blacks – A New Carbon Black Family Designed to Meet Truck Tire Performance Demands. In: Kautschuk Gummi Kunststoffe (KGK) 10/1999

FREYERMUTH, G. S. (1997): Lust nach Laune und Leben ohne Ende. In: Telepolis, 17. September 1997 (http://www.heise.de/tp/deutsch/inhalt/konf/2196/1.html; abgerufen am 19. April 2003)

FRIEDEWALD, M., DA COSTA, O., PUNIE, Y. et al. (2003): Science and Technology Roadmapping: Ambient Intelligence in Everyday Life (AmI@Life). Institute for Prospective Technology Studies (IPTS), Sevilla

FROST & SULLIVAN (2001a): Bioinformatik: Ein neuer Weg in der Wirkstoffforschung. Presseinformation vom 12. September 2001, Frankfurt a. M.

FROST & SULLIVAN (2001b): Kräftiges Wachstum bei HTS durch Wirkstoffforschung. Presseinformation vom 15. November 2001, Frankfurt a. M.

FROST & SULLIVAN (2002a): Interoperabilität von Systemen wird zur Herausforderung für die Bioinformatik. Presseinformation vom 7. Oktober 2002, Frankfurt a. M.

FROST & SULLIVAN (2002b): Nukleinsäure-Testverfahren: Echtzeit-PCR bringt Markt in Schwung.Presseinformation vom 26. Februar 2002, Frankfurt a. M.

FROST & SULLIVAN (2002c): Lab-on-a-Chip: Minilabor mit großartiger Zukunft. Presseinformation vom 23. Januar 2002, Frankfurt a. M.

FRYDRYCH, M., SILFSTEN, P., PARKKINEN, S. et al. (1998): Color Recognition with Bacteriorhodopsin. In: Pacific Symposium on Biocomputing 3, S. 521–532

FULLERTON, E. E., MARGULIES, D. T., SCHABES, M. E. et al. (2000): Antiferromagnetically coupled magnetic media layers for thermally stable high-density recording. In: Appl. Phys. Lett. 77(23), S. 3806–3808

FZR (Forschungszentrum Rossendorf) (2002): Dieser Speicher behält was er verspricht – FZR verleiht drei Preise. (http://www.fz-rossendorf.de/Presse/fzr.preise.2002.021219.html)

GAO, Y., BANDO, Y. (2002): Carbon Nanothermometer Containing Gallium (Discovery of Carbon Nanothermometer; Tagung „Trends in Nanotechnology", Santiago de Compostela, 09/2002). In: Nature 415, S. 599. (http://www.cmp-cientifica.com/cientifica/frameworks/generic/public_users/TNT02/files/AbstractBando.pdf)

GARDNER, E. (2002): Brainy Food: Industry sink their Teeth into edible Nano. (http://www.smalltimes.com/document_display.cfm?section_id=46&document_id=3989; abgerufen am 28. November 2002)

GEDON, H., FABER, I. (2000): Nanokristalline Werkstoffe. In: Soldat und Technik 1/2000, S. 54–55

GENZER, J. (2002): SYPF 1.4, DPG-Frühjahrstagung Regensburg 2002. In: Verhandl. DPG (VI) 37, S. 497

GERSHENFELD, N. A. (1999): Wenn die Dinge denken lernen. München/Düsseldorf

GERSHENFELD, N. A., CHUANG, I. L. (1998): Flüssige Quantencomputer. In: Spektrum der Wissenschaft 8, S. 54–59

GLIMELL, H. (2001): Dynamics of the Emerging Field of Nanoscience. In: Roco, M. C., Bainbridge, W. S. (Hg.): Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology. S. 156–160

GOLDHABER-GORDON, D., MONTEMERLO, M. S., LOVE, J. C. et al. (1997): Overview of Nanoelectronic Devices. In: Proceedings of the IEEE 85(4), S. 521–540

GOSER, K. F., PACHA, C. (1998): System and Circuit Aspects of Nanoelectronics. In: ESSCIRC ’98 – 24th European Solid-State Circuits Conference. Den Haag

GROSS, M. (2003): http://www.chemsoc.org/chembytes/ezine/2002/gross_may02.htm (abgerufen am 28. April 2003)

GRÜNBERG, P. (1995): Riesenmagnetowiderstand in magnetischen Schichtstrukturen. In: Physikalische Blätter 51(11), S. 1077–1081

GÜNTHERODT, G., KORTE, U., MAY, U., RÜDIGER, U. (1999): Computer-Arbeitsspeicher und/oder Festplatte in Bedrängnis? Der Angriff des Nanomagnetismus. In: RWTH Themen 1/1999, S. 35–39

HABERMAS, J. (2001): Die Zukunft der menschlichen Natur: Auf dem Weg zu einer liberalen Eugenik? Frankfurt a. M.

HAMILTON, S. (1999): Taking Moore’s Law Into the Next Century. In: IEEE Computer 32(1), S. 43–48

HAMPP, N. (1993): Heat-proof proteins. In: Nature 366, S. 12

HAMPP, N., BRÄUCHLE, C., OESTERHELT, D. (1992): Mutated bacteriorhodopsin: competitive materials for optical information processing? In: MRS Bulletin 17, S. 56–60

HANSELMANN, R. (2002): NanomedX; Experteninterview von Frau Dr. A. Eckardt (Basler & Hofmann AG) am 22. Oktober 2002

HANSELMANN, R., SCHIRRA, H. (2002): NanomedX; Experteninterview von Frau Dr. A. Eckardt (Basler & Hofmann AG) am 22. Oktober 2002

HARTMANN, U. (2001): Nanobiotechnologie – Eine Basistechnologie des 21. Jahrhunderts. Zentrale für Produktivität und Technologie Saar e.V., Saarbrücken

HARUTA, M., DATÉ, M. (2001): Advances in the Catalysis of Au Nanoparticles. In: Applied Catalysis A 222, S. 427–437

HEALEY, J., SEGER, J., PICARD, R. (1999): Quantifying Driver Stress: Developing a System for Collecting and Processing Bio-Metric Signals in Natural Stress. Technical Report, M.I.T. Media Laboratory, Cambridge

HEATH, J. R., KUEKES, P. J., SNIDER, G. S., WILLIAMS, R. S. (1998): A Defect-Tolerant Computer Architecture: Opportunities for Nanotechnology. In: Science 280, S. 1716–1721

HEDDERICH, R. (2001): Entspiegelung auf der Materialica – Nanoporöse Polymerfilme als hochwertige Antireflexbeschichtungen. Presseinfo 05/2001. (http://www. nanomat.de)

HELLEMANS, A.; MOORE, S. K. (2001): Molecular Devices, On Their Feet and Walking. In: IEEE Spectrum 38(12), S. 20–22

HERRMANN, W. A. (2000): Zukunftstechnologie Katalyse. In: Felcht, U.-H.: Chemie – Eine reife Industrie oder weiterhin Innovationsmotor? Frankfurt a. M.

HILARIUS, V. (2002): Nasschemische Herstellung und Anwendung von Nanopartikeln. In: Aktuelle Anwendungen in der Nanotechnologie. IIR-Konferenz am 17. bis 18. September 2002, Köln

HOFMANN, K., SPANGENBERG, B. (2000): Der „ultimative“ Transistor – Traum oder Wirklichkeit? In: Physikalische Blätter 56(9), S. 45–50

HOHENBERGER, W. (2000): Submikron und Nano – Revolution bei Füllstoffen und Compounds. In: Kunststoffe 90(8), S. 96–99

HOLISTER, P., HARPER, T. E. (2002): The Nanotechnology Opportunity Report. Studie von CMP Cientifica, März 2002, Las Rozas (http://www.cmp-cientifica.com)

HSL (Health and Safety Laboratory) (2002): Risk Assessment of airborne Nanoparticles in the Workplace (NANOSAFE). FP6: Expression of Interest for Integrated Project. Health and Safety Laboratory, Sheffield, UK (http://www.tau.ac.il/research/EU/europe/nano/EOIvers2.pdf; abgerufen am 15. Oktober 2002)

HULLMANN, A. (2001): Internationaler Wissenstransfer und technischer Wandel. Heidelberg

HÜSING, B. et al. (1998): Xenotransplantation. Schweizerischer Wissenschaftsrat, Technology Assessment 30/1998, Bern

HÜSING, B., BIERHALS, R., FRIEDEWALD, M. et al. (2002): Technikakzeptanz und Nachfragemuster als Standortvorteil. Bericht an das Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung. Veröffentlichung in Vorbereitung. Karlsruhe (ISI)

HUTCHBY, J. A., BOURIANOFF, G. I., ZHIRNOV, V. V., BREWER, J. E. (2002): Extending the Road Beyond CMOS. In: IEEE Circuits & Devices Magazine March 2002, S. 28–41

IBM (2002): IBM Deutschland: „IBM Forschungsprojekt ‚Tausendfüßler‘ erreicht zwanzigfache Dichte heutiger Magnetspeicher“. Pressemitteilung vom 11. Juni 2002

IBM (2003): http://zurich.ibm.com (abgerufen am 13. März 2003)

IDW (Informationsdienst Wissenschaft) (2002): Zuckermoleküle speichern Wirkstoffe in Textilien. (http://www.idw-online.de; abgerufen am 27. November 2002)

INT (2001): Institut für Nanotechnologie 1998 bis 2001. Forschungszentrum Karlsruhe. Karlsruhe

IOB (2003): http://www.iob.org/EJ/S/UNREG/journal/0957-4484 (abgerufen am 3. März 2003)

ISOTEC (o. J.): http://www.isoteg.de

IST ADVISORY GROUP (2002): Strategic Orientations and Priorities for IST in FP6. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg

ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) (2001): International Technology Roadmap for Semiconductors, 2001 Edition. International SEMATECH, Austin

ITV (Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf) (2002a): Smart Clothes – Technologien für Arbeits- und Schutzkleidung, Healthcare sowie Sport und Freizeit. Pressemitteilung vom Mai 2002 (http://www.itv-denkendorf.de)

ITV (Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf) (2002b): Lotus-Effekt auf Textilien – Innovative Out-door-Textilien mit Selbstreinigungseffekt. Pressemitteilung vom Mai 2002. (http://www.itv-denkendorf.de)

JAMES, D. F. V. (1998): Theory of Heating of the Quantum Ground State of Trapped Ions. In: Physical Review Letters 81(2), S. 317–320

JANKOWSKI, P. (2001): Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie – Schlüsseltechnologien für Deutschland. Sal. Oppenheim, Köln

JANSEN, J., MAIBACH, H. I. (2001): Encapsulation to Deliver Topical Actives. In: Barel, A. O. et al. (Hg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology. New York

JOACHIM, C., GIMZEWSKI, J. K. (2001): Single Molecular Rotor at the Nanoscale. In: Sauvage, J.-P.: Molecular Machines and Motors. Berlin u. a. O.

JOERGER, R., KLAUS-JOERGER, T., OLSSON, E., GRANQVIST, C. G. (2000): Optical Properties of Biometrically Produced Selective Coatings. In: Solar Energy 69, S. 27–33

JOHN, P. M. S., KAM, L., TURNER, S. W., CRAIGHEAD, H. G., ISAACSON, M. S., TURNER, J. N., SHAIN, W. (1997): Preferential glial cell attachment to microcontact printed surfaces. In: J. Neuroscience Methods 75, S. 171–177

JOHNSON, C. (2002): Nanocontacts Could Make Hard Drives Go „Ballistic“. In: EE Times, 9. Juli 2002 (http://www.eet.com/at/news/OEG20020709S0041)

JOHNSON, M. (2000): Magnetoelectronic memories last and last... In: IEEE Spectrum 37(2), S. 33–40

JONSCHKER, G. (2001): Nanokomposite – Multifunktionelle Beschichtungen für Kunststoff und Glas. Konferenz-Einzelbericht: Glas im Automobil – Neue Entwicklungen und Möglichkeiten der Fahrzeugverglasung, 3./4. Mai 2001. Essen

JOSLIN, C. (2002): Carbon Nanotubes Fluorescence (frost.com, Inside R&D vom 14. August 2002)

JOY, B. (2000): Why the Future doesn’t need us. In: Wired, April 2000 (http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy_pr.html; abgerufen am 8. Februar 2003)

KALIL, T. (2001): National Nanotechnology Initiative. In: Roco, M. C., Bainbridge, W. S. (Hg.): Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology. S. 20–23

KANE, B. E. (2000): Silicon-Based Quantum Computation. In: Fortschritte der Physik 48(9–11), S. 1023–1041

KELLY, T. R., SESTELO, J. P. (2001): Rotary Motion in Single-Molecule Machines in Sauvagne. Berlin u. a. O.

KENJI, I., RIKAKO, T. MITSUHIRO, O. et al. (2001): Nanometer-size structures fabricated by Bio-Nano-Process. In: Ninth Foresight Conference on Molecular Nanotechnology, November 9–11, 2001, Santa Clara

KIERNAN, V. (1997): DNA-based computers could race past supercomputers, researchers predict. In: The chronicle of higher education, 28. November 1997, S. 1–7

KILIAN, U. (2003): Das magnetische Gedächtnis. In: Physik Journal 2(2), S. 50–51

KIM, D. K. et al. (2002): Biomedical Application of Ferrofluids containing magnetite Nanoparticles. In: Hahn, H.W. et al.: Synthesis, functional Properties and Applications of Nanostructures. Materials Research Society, Symposium Proceedings Volume 676, Warrendale

KISCH, H., MACYK, W. (2002): Halbleiter-Photokatalyse. In: Nachrichten aus der Chemie 50, S. 1078–1082

KLEE, D., SALBER, J. (2002): Kompetenzzentrum Biowerkstoffe Aachen; Experteninterview von Frau Dr. A. Eckardt (Basler & Hofmann AG) am 22. August 2002

KLEINER, K., HOGAN, J. (2003): How safe is nanotech? In: New Scientist 29 (March 2003), S. 14–15

KNITTEL, D. (2002): Textilveredelung – ein breites Feld für industrielle Anwendung der Nano- und Biotechnologie. In: Nanotechnologie – Marktchancen für den Mittelstand. Kongress der IHK, 21. November 2002, Köln

KNURHAHN, P., BODDERAS, E. (2001): Mediziner nehmen Moleküle an die lange Leine. In: VDI-Nachrichten vom 13. Juli 2001

KOCH, M. (2001): Saarbrücker Werkstoffwissenschaftler optimieren Titanimplantate. Campus (http://www.uni-saarland.de/verwalt/presse/campus (2001/1/22-Titan-implantate.html; abgerufen am 20. August 2002)

KÖHLER, M. (2001): Nanotechnologie – Eine Einführung in die Nanostrukturtechnik. Weinheim u. a. O.

KOLO, C., CHRISTALLER, T., PÖPPEL, E. (1999): Bioinformation: Problemlösung für die Wissensgesellschaft. Technik, Wirtschaft und Politik 38, Heidelberg

KÖNIG, P. (2001): Zwischen Fakten und Fiktion (Diskussionsbeiträge). In: unimagazin 3/01

KÖNIG, U. (2002): Nanostrukturen: Konzepte zur Ressourcenschonung im Auto. In: Aktuelle Anwendungen in der Nanotechnologie. IIR-Konferenz, 17./18. September 2002, Köln

KÖNIG, U. et al. (2001): Nano im Auto – „Leuchtturm"-Projektvorschlag. BMBF-Präsentation am 27. August 2001

KÖSTER, T., GOLDSCHMIDTBOEING, F., HADAM, B. et al. (1999): Coulomb Blockade Effects in a Highly Doped Silicon Quantum Wire Fabricated On Novel Molecular Beam Epitaxy Grown Material. In: Japanese Journal of Applied Physics 38, S. 465–468

KRALJIC, M., MANDIC, Z., DUIC, L. (2003): Inhibition of steel corrosion by polyaniline coatings. In: Corrosion Science 45(1), S. 181–198

KRÄTSCHMER, W., LAMB, L. D., FOSTIROPOULOS, K., HUFFMAN, D. R. (1990): Solid C_{60}: a new form of carbon. In: Nature 347, S. 354–358

KREMPL, S. (2001): Nano – Die elementare Revolution. Interview mit dem Krypto-Pionier, Extropianer und Computerwissenschaftler Ralph Merkle. In: Telepolis, 3. April 2001 (http://www.heise.de/tp/deutsch/inhalt/co/7273/1.html; abgerufen am 19. April 2003)

KRETSCHMER, T., KOHLHOFF, J. (Hg.) (1995): Neue Werkstoffe – Überblick und Trends. Heidelberg

KUNZE, C., GROSSMANN, U., STORK, W., MÜLLER-GLASER, K. D. (2002): Application of Ubiquitous Computing in personal health monitoring systems. In: Kongressbericht der 36. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik (DGBMT) im VDE, Karlsruhe, 25. bis 28. September 2002. Berlin, S. 360–362

KURSCHAT, R. (2002): Motoren im Molekülformat. In: Neue Zürcher Zeitung vom 2. Oktober 2002

KURZWEIL, R. (1999): Homo s@piens. Leben im 21. Jahrhundert – Was bleibt vom Menschen? Köln (Orig.: „The Age of the Spiritual Machines")

KURZWEIL, R. (2001): Die Maschinen werden uns davon überzeugen, dass sie Menschen sind. In: Schirrmacher 2001a, S. 98–109

LANDAU, P. (1999): Metallocene Catalysts Positioned for Success at Commercial Quantities. In: Chemical Market Reporter 256(2), S. 10

LANG, M. (2002): Schnipsel-Jagd. In: Spektrum der Wissenschaft 10

LANGENFELD, S. (2002): Nanotechnologie in der Automobilindustrie. In: Aktuelle Anwendungen in der Nanotechnologie. IIR-Konferenz, 17./18. September 2002, Köln

LANGENFELD, S., FRIEDRICH, H., MEYER, C. (2001): Adjusted Functional Surfaces by Nanotechnology for Automotive Applications. Konferenz-Einzelbericht: Materials Week 2001, International Congress on Advanced Materials, their Processes and Applications, 1. bis 4. Oktober 2001, München

LANIER, J. (2001): Aus den Ruinen unserer Zeit wächst ein neuer Kapitalismus. In: Schirrmacher 2001a, S. 90–97

LAPERRE, J. (2002): Will nanotechnology be of any importance for textile technology? Internationales Innovationsforum und Symposium für Hochtechnologie-Bekleidungstextilien AVANTEX, 13. bis 15. Mai 2002

LARBALESTIER, D. et al. (2001): High-Tec superconducting materials for electric power applications. In: Nature 414, S. 368–377

LASER FOCUS WORLD (2000): In: „Laser Focus World". Februar 2000

LASER MAGAZIN (2002): Nanotechnologie im Automobilbau. Ausgabe 3/2002

LAU, C. (2002): Nanotechnology and the Department of Defense. In: Roco, M. C., Bainbridge, W. S. (Hg.): Converging Technologies for Improving Human Performance. S. 308–309

LAUTENSCHLÄGER, H. (2001): Liposomes. In: Barel, A. O. et al. (Hg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology. New York

LAVAL, J.-M., MAZERAN, P.-E., THOMAS, D. (2000): Nanobiotechnology and its Role in the Development of new analytical Devices. In: Analyst 125, S. 29–33

LE BARNY, P., DENTAN, V., FACOETTI, H. et al. (2000): Application of organic electroluminiscent materials in visualisation. In: Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série IV (Physics) 1(4), S. 493–508

LEE, S. C. (1998): Biotechnology for nanotechnology. In: Trends in Biotechnology 16, S. 239–240

LEHMANN BROTHERS (1998): Pressemitteilung vom 7. Juni 1998

LEHR, C. M. (2002): Experteninterview von Frau Dr. A. Eckardt (Basler & Hofmann AG) am 2. September 2002; Institut für Umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

LEIER, A., RICHTER, C., NANZHAF, W., RAUHE, H. (2000): Cryptography with DNA binary strands. In: BioSystems 57, S. 13–22

LEOBANDUNG, E., GUO, L., WANG, Y., CHOU, S. (1995): Observation of Quantum Effects and Coulomb blockade in Silicon Quantum-Dot Transistors at temperatures over 100 K. In: Applied Physical Letters 67(7), S. 938–940

LEUENBERGER, M. N., LOSS, D. (2001): Nanoscale Superconducting Quantum Bits. In: Physica C 350, S. 161–165

LEUNG, C. K. Y. (2001): In: NDT&E International 34, S. 85–94

LÉVY, P. (1997): Die kollektive Intelligenz – für eine Anthropologie des Cyberspace. Mannheim

LIEBER, C. M. (2001): Schaltkreise vom Allerkleinsten. In: Spektrum der Wissenschaft Spezial 2 (Nanotechnologie), S. 40–47

LINKE, D. (1993): Hirnverpflanzung – Die erste Unsterblichkeit auf Erden. Reinbeck

LOCATELLI, F., GAMEZ, P., LEMAIRE, M. (1998): Molecular Imprinting of Polymerised Catalytic Complexes in Asymmetric Catalysis. In: Journal of Molecular Catalysis A 135, S. 89–98

LUTHER, W. (2003): Anwendungen der Nanotechnologie in Raumfahrtentwicklungen und -systemen. VDI-Technologiezentrum, Schriftenreihe Zukünftige Technologien Nr. 43, Düsseldorf

MALANOWSKI, N. (2001): Vorstudie für eine Innovations- und Technikanalyse Nanotechnologie. VDI-Technologiezentrum, Schriftenreihe Zukünftige Technologien Nr. 35, Düsseldorf

MANGE, D., SANCHEZ, E., STAUFFER, A. et al. (2002): Embryonics: A New Methodology for Designing Field-Programmable Gate Arrays with Self-Repair and Self-Replicating Properties. In: Micheli, G. D., Ernst, R. et al. (Hg.): Readings in Hardware/Software Co-Design. San Francisco, S. 643–655

MANYUSIWALLA, A., DAAR, A. S., SINGER, P. A. (2003): ‚Mind the Gap‘: science and ethics in nanotechnology. In: Nanotechnology (Online-Ausgabe) 14/3 (März 2003), R 9–13 (http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/14/3/201/; abgerufen am 23. Juni 2003)

MATERIALS WORLD (2001): Nanotechnology toughens up steel with tiny precipitates.

MATTERN, F. (2001): The Vision and Technical Foundations of Ubiquitous Computing. In: Upgrade: The European Online Magazine for the IT Professional 2(5), S. 3–6

MATTERN, F. (2003): Ubiquitous Computing: Szenarien einer informatisierten Welt. In: Zerdick, A., Picot, A. et al. (Hg.): E-Merging Media – Digitalisierung der Medienwirtschaft. Berlin/Heidelberg

MAZUMDER, P., KULKARNI, S., BHATTACHARYA, M. et al. (1998): Digital Circuit Applications of Resonant Tunnelling Devices. In: Proceedings of the IEEE 86(4), S. 664–686

MENGEL, S. (1997): XMR-Technologien. VDI Technologiezentrum, Schriftenreihe Zukünftige Technologien Nr. 20, Düsseldorf

MENGEL, S. (1999): Technologieanalyse Magnetismus. Band 1: Molekulare Magnete. VDI Technologiezentrum, Schriftenreihe Zukünftige Technologien Nr. 19, Düsseldorf

MENON, A. K., GUPTA, B. K. (1999): Nanotechnology: A Data Storage Perspective. In: NanoStructured Materials 11(8), S. 965–986

MERKLE, R. C. (1990): NASA and Self-Replicating Systems: Implications for Nanotechnology. (http://www.zyvex.com/nanotech/selfRepNASA.html; abgerufen am 29. April 2003)

MERKLE, R. C. (1999): Biotechnology as a route to nanotechnology. In: Trends in Biotechnology 17, S. 271–274

MIETH, D. (1994): Geburt und Tod – Technik an den Grenzen des Lebens. In: Funkkolleg Technik. DIFF/Universität Tübingen, Tübingen

MILLER, F. (2001): Polytronic: Chips von der Rolle. In: Fraunhofer Magazin 4, S. 8–12

MILSTEIN, S. et al. (2001): Definition of Cosmetics. In: Barel, A. O. et al. (Hg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology. New York

MINATECH INFORMATION DAY (2001): Reports on Micro and Nano Technologies. Conference on Micro and Nano Technologies, VDI/VDE Technologiezentrum Informationstechnik, 12. Dezember 2001, Teltow

MIYAGAWA, C. (2002): Rhodiumkatalysierte Hydroformylierung höhermolekularer Olefine in Mikroemulsionen. Dissertation, TU Braunschweig, Braunschweig

MIYAZAKI, T., TEZUKA, N. (1995): Giant magnetic tunneling effect in Fe/A2O3/Fe junction. In: J. Mag. Magn. Mater. 139, S. L231–L234

MOORE, G. E. (1965): Cramming More Components Onto Integrated Circuits. In: Electronics 38(8), S. 114–117

MOORE, G. E. (1979): VLSI: Some Fundamental Challenges. In: IEEE Spectrum 16(4), S. 30–37

MORE, M. (1996): Vom biologischen Menschen zum posthumanen Wesen. In: Telepolis, 17. Juli 1996 (http://www.heise.de/tp/deutsch/inhalt/co/2043/1.html; abgerufen am 19. April 2003)

MORE, M. (1997): Europäische Ursprünge – amerikanische Zukunft? In: Telepolis, 19. Juni 1997 (http://www.heise.de/tp/deutsch/special/mud/6142/1.html; abgerufen am 19. April 2003)

MORE, M. (2003): Extropian Principles 3.0 – A Transhumanist Declaration. (http://www.extropy.org/ideas/principles.html; abgerufen am 19. April 2003)

MOSSMANN, B. T., BIGNON, J., CORN, M., GEE, J. B. (1990): Asbestos: scientific developments and implications for public policy. In: Science 247, S. 294–301

MPG (Max-Planck-Gesellschaft) (2002): Presseinformation vom 18. Oktober 2002. PRI C 23/T15/2002 (99) (http://www.mpg.de/pri02/pri0299.htm; abgerufen am 11. November 2002)

MÜNTER, D. (2001): Nano-Sonnencreme. In: WDR (Westdeutscher Rundfunk) vom 3. April 2001 (http://www.quarks.de/nano/005.htm; abgerufen am 29. Juli 2002)

MYHRVOLD, N. (2001): Ein Gewehr verwandelt uns nicht in einen Killer. In: Schirrmacher 2001a, S. 78–89

NANOBIO (2003): http://www.nanobio.de (abgerufen am 10. März 2003)

NANOBIONET (2002): Nanobionet: Bakterizide Nanozid® Beschichtung. (http://www.nanobionet.de/Beispiele-details/ItN%20-Bakterizid.htm; abgerufen am 31. Juli 2002)

NANOGATE (o. J.): http://www.nanogate.de

NANOMEDX (2002): Produkte. (http://www.nanomedx.de/Produkte.html; abgerufen am 20. August 2002)

NANOSPHERE (2002): Company Overview, Technology, Copyright 2001. (http://www.nanosphere-inc.com/technology/technology.htm; abgerufen am 31. Juli 2002)

NANOTECH (2003): http://www.nanotechweb.org (abgerufen am 3. März 2003)

NANO-TEX (o. J.): http://www.nano-tex.com

NASA (2000): Nanotube Technology Assessment. Office of Aero-Space Technology, September 6, 2000

NASS, R. (2002): In: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung. Drittes Fachforum Nanotechnologie, OTTI-Kolleg, 22./23. Oktober 2002, Regensburg

NASSAUER, J., FEIGL, T. (2002): Technologie-Management in der Medizintechnik. In: Wintermantel, E., Ha, S.-W. (Hg.): Medizintechnik mit biokompatiblen Werkstoffen und Verfahren. Berlin u. a. O.

NEWMAN, C. (2003): Stoffe, die mitdenken. In: National Geographic Deutschland 1

NFO Infratest (2002): Monitoring Informationswirtschaft. 4. Faktenbericht im Auftrag des BMWi, NFO Infratest GmbH & Co, München

NICKLOUS, M. S., WELSCH, M. (2003): Intelligente Etiketten. In: Sauerburger, H. (Hg.): Ubiquitous Computing. dpunkt, HMD, Theorie und Praxis der Wirtschaftsinformatik 229, Heidelberg, S. 81–89

NIEMEYER, C. (2002): DNA as a Material for Nanobiotechnology. In: Rosoff, M. (Hg.): Nano-Surface Chemistry. New York/Basel

NIESING, B. (2002): Leuchtende Kunststoffe. In: Fraunhofer Magazin 3, S. 30–31

NORMAN, D. A. (1998): The Invisible Computer. Cambridge

NSTC (National Science and Technology Council/Committee on Technology) (2000): National Nanotechnology Initiative (NNI). The Initiative and its Implementation Plan. Washington D. C.

NSTC-IWGN (National Science and Technology Council/Committee on Technology – The Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology) (1999): Nanotechnology. Shaping the World Atom by Atom. Washington, D. C. (http://www.ostp.gov/NSTC/html/iwgn/IWGN.Public.Brochure/IWGN.Nanotechnology.Brochure.pdf; abgerufen am 15. April 2003)

OESTERHELT, D., BRÄUCHLE, C., HAMPP, N. (1991): Bacteriorhodopsin: a biological material for information processing. In: Quarterly Reviews of Biophysics 24, S. 425–478

OGIHARA, M., RAY, A. (2000): DNA Computing on a Chip. In: Nature 403, S. 143–144

ORLICH, B. (2000): Biokatalyse an hydrophoben Substraten mit Tensiden und Membranen als reaktionstechnische Werkzeuge. Dissertation, TU Berlin, Berlin

ORNL (Oak Ridge National Laboratory) (1999): Breakthroughs pave way for spinach-based electronic devices. In: APS News 6, S. 1–2

OSARTIS (2002): Ostim®. (http://life-box.cid-online.net/members/frontend/as/content.asp?show=706&profil=osartis; abgerufen am 30. Juli 2002)

PARADISO, J. (2000): Renewable Energy Sources for the Future of Mobile and Embedded Computing. Invited talk at Computing Continuum Conference, 16 March 2000, San Francisco

PATSCHEIDER, J. (2002): In: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung, OTTI-Kolleg, Drittes Fachforum Nanotechnologie, 22./23. Oktober 2002, Regensburg

PEASE, A. R., STODDART, J. F. (2001): Computing at the Molecular Level. In: Sauvage, J.-P. (Hg.): Molecular Machines and Motors. Berlin u. a. O.

PETER, C. (2001): Physikalische Charakterisierung optisch schaltender Fenster auf Basis photoelektrochemischer elektrochromer Systeme. Dissertation, Universität Freiburg, Freiburg im Breisgau

PFEIFER, R. (2001): Die Mär von den intelligenten Monstern. In: unimagazin 3/01

PHYSICS TODAY (1993): STM rounds up electron waves at the QM corral. In: Physics Today 46(11), S. 17–19 (http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/library.html; abgerufen am 28. April 2003)

POBOJEWSKI, S. (2002): U-M Scientists to develop nanosensors for astronauts. (http://www.med.umich.edu/opm/newspage/2002/nanosensors.htm; abgerufen am 31. Juli 2002)

POMPEI, F. J., SHARON, T., BUCKLEY, S. J., KEMP, J. (2002): An Automobile-Integrated System for Assessing and Reacting to Driver Cognitive Load. In: Proceedings of Convergence 2002. IEEE SAE, S. 411–416

POPE, C., BURNETT, R. T., THUN, M. J., CALLE, E. E., KREWSKI, D., ITO, K., THURSTON, G. D. (2002): Lung Cancer, cardiopulmonary Mortality, and long-term Exposure to fine particulate Air Pollution. In: JAMA 287(9), S. 1132–1141

PORT, O., CROCKETT, R. O. (2002): Nano Technology. Business Week online vom 25. März 2002 (http://aol.businessweek.com/bw50/content/mar2002/a3776078.htm; abgerufen am 31. Juli 2002)

PRESKILL, J. (1998): Fault-Tolerant Quantum Computation. In: Lo, H.-K., Spiller, T. et al. (Hg.): Introduction to quantum computation and information. Singapore

PRIBAT, D. (2002): FEDs in the Landscape of Flat Panel Displays: Strengths and Weaknesses. Paper presented at the 15th International Vacuum Microelectronics Conference and 48th International Field Emission Symposium (IVMC & IFES 2002), Lyon, France, July 7–11

PRICE, R. L. et al. (2002): Increased Osteoblast and decreased smooth Muscle Cell Adhesion on biologically-inspired Carbon Nanofibers. In: Hahn, H. W. et al. (Hg.): Synthesis, Functional Properties and Applications of Nanostructures. Materials Research Society, Symposium Proceedings Volume 676, Warrendale

PRIDÖHL, M. (2002): In: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung, Drittes Fachforum Nanotechnologie, OTTI-Kolleg, 22./23. Oktober 2002, Regensburg

PRINS, L. J., REINHOUDT, D. N., TIMMERMANN, P. (2001): Nichtkovalente Synthese mit Wasserstoffbrücken. In: Angewandte Chemie 113, S. 2446–2492

PTJ (Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger Jülich) (2003): Info Biotechnologie: Nanobiotechnologie.

REEK, J. N. H. et al. (2002): Core and Periphery Functionalized Dendrimers for Transition Metal Catalysis; a Covalent and a Non-Covalent Approach. In: Reviews in Molecular Biotechnology 90, S. 159–181

REGIS, E. (1994): Meet the Extropians. In: Wired, October 1994 (http://www.wired.com/wired/archive/2.10./extropians_pr.html; abgerufen am 30. April 2003)

REINHOLD, B. (2001): Anforderungen der Automobilindustrie an technische Oberflächen. In: Galvanotechnik 92

REISS, T., BÜHRER, S., CHEN, Q. et al. (2001): Potenzialanalyse Forschung unter Schwerelosigkeit. Unveröffentlichter Bericht an das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Referat 622: Raumfahrt, ISI, Karlsruhe

REISS, T., HÜSING, B., JAECKEL, G. (1994): Analyse von Entwicklungstrends in der Biotechnologie. Teil 1: Biomolekulare Funktionssysteme für die Technik. ISI, Karlsruhe

REPENNING, D. (1999): Nanodispersionsgehärtete Chromschichten – Eine Alternative zu galvanischen Chromschichten. In: Metalloberfläche (mo) 53(10)

REVENKO, I. (2001): Probing the Life Sciences with Atomic Force Microscopy. In: Bischoff, G., Hein, H.-J. (Hg.): Micro- and Nanostructures of biological Systems. Aachen

REYNOLDS, G. H. (2002): Forward to the Future: Nanotechnology and Regulatory Policy. Pacific Research Institut Briefing. San Francisco

RICE, B. P., CHEN, C., CLOOS, L., CURLISS, D. (2001): Carbon Fiber Composites: Organoclay-Aerospace Epoxy Nanocomposites, Part I. In: SAMPE Journal 09/10, S. 7–9

RICHTER, C., LEIER, A., BANZHAF, W., RAUHE, H. (2000): Private and public key DNA steganography. In: Condon, A., Rozenberg, G. (Hg.): Preliminary Proceedings of the Sixth DIMACS Workshop on DNA-Computing. Leiden, The Netherlands, S. 273–274

RIEFFEL, E., POLAK, W. (2000): An Introduction to Quantum Computing for Non-Physicists. In: ACM Computing Surveys 32(3), S. 300–335

RISCH, L. (2002): The end of the CMOS roadmap – new landscape beyond. In: Material Science and Engineering C 19(1–2), S. 363–368

ROBERTSON, J. (2002): Materials Science and Engineering. In: R 37, S. 129–281

ROBINSON, W. H. et al. (2002): Proteomics Technologies for the Study of Autoimune Disease. In: Arthritis & Rheumatism 46(4), S. 885–893 (http://ccis.stanford.edu/newsarticles/utz_arthrheum.pdf; abgerufen am 5. August 2002)

ROCO, M. C. (2001a): International Strategy for Nanotechnology Research and Development. National Science Foundation

ROCO, M. C. (2001b): From Vision to the Implementation of the U. S. National Nanotechnology Initiative. In: Journal of Nanoparticle Research 3(1), S. 5–11

ROCO, M. C. (2001c): National Nanotechnology Investment in the FY 2002 Budget Request by the President – AAAS Report XXVI, Washington, D. C., July 2001 (updated on February 5, 2002), S. 225–233

ROCO, M. C. (2002a): The Action Plan of the U. S. National Nanotechnology Initiative. In: Roco, M. C., Tomellini, R. (Hg.): Nanotechnology – Revolutionary Opportunities and Social Implications. Luxembourg, S. 31–38 (http://www.nsf.gov/mps/divisions/dmr/research/lecce_workshop.pdf; abgerufen am 15. April 2003)

ROCO, M. C. (2002b): National Nanotechnology Investment in the FY 2003. Budget Request by the President. (http://www.nano.gov/2003budget.html)

ROCO, M. C. (2002c): National Nanotechnology Initiative and a global perspective. Vortrag auf dem NSF Symposium „Small Wonders“, Exploring the Vast Potential of Nanoscience, 19. März 2002, Washington D.C.

ROCO, M. C. (2002d): The Future of the National Nanotechnology Initiative. Präsentation am 5. November 2002

ROCO, M. C., BAINBRIDGE, W. S. (Hg.) (2001): Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology, Dordrecht u. a. O. (http://www.wtec.org/loyola/nano/NSET.Societal.Implications/nanosi.pdf; abgerufen am 4. April 2003)

ROCO, M. C., BAINBRIDGE, W. S. (Hg.) (2002a): Converging Technologies for Improving Human Performance – Nanotechnology, Biotechnology, Information

Technology and Cognitive Science. (http://www.infocast-inc.com/NBIC/nbic.asp.; abgerufen am 4. April 2003)

ROCO, M. C., BAINBRIDGE, W. S. (2002b): Overview. In: Roco, M. C., Bainbridge, W. S. (Hg.): Converging Technologies for Improving Human Performance. S. 1–24

ROCO, M. C., TOMELLINI, R. (Hg.) (2002): Nanotechnology – Revolutionary Opportunities and Social Implications. 3rd Joint EC-NSF Workshop on Nanotechnology, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg

ROCO, M. C., WILLIAMS, R. S., ALIVISATOS, P. (Hg.) (2000): Nanotechnology Research Directions: Vision for Nanotechnology in the Next Decade. Boston

ROHRER, H. (2001): Nanotechnik – Versprechen und Ängste. In: Neue Zürcher Zeitung vom 22. August 2001

RUBAHN, H.-G. (2002): Nanophysik und Nanotechnologie. Stuttgart u. a. O.

RUBEN, A. J., LANDWEBER, L. F. (2000): The past, present and future of molecular computing. In: Nature Reviews 1, S. 69–72

RÜDIGER, U., BESCHOTEN, B., CALARCO, R. et al. (2001): Magnetische Computer-Arbeitsspeicher: Maßschneidern und Kontrolle des Magnetismus auf der Nanometer-Skala. In: RWTH Themen 1/2001, S. 67–73

RÜGHEIMER, U., SCHILLER, R. (2002): Von Zwergen und Mottenaugen – Audi zeigt Nanotechnologien auf der Hannover-Messe. In: Audi AG, Kommunikation Produkt und Technik, 4. April 2002, Ingolstadt

RUSSELL, E. (2001): Nanotechnology and the Shrinking World of Textiles. Textile Horizons, September–October 2001

SACHTLEBEN (2000): Hombitec® RM 130 F. Product Information, Duisburg

SACHTLEBEN (2003): http://www.sachtleben.de/h/d/anw/0500d.html

SAXL, O. (2002): Nanotechnology – What it means for the Life Sciences. Business Briefing: Life Sciences Technology (http.//www.nano.org.uk/saxl.pdf; abgerufen am 31. Juli 2002)

SCHABER, P. (2002): Professur der Universität Zürich, Arbeits- und Forschungsstelle für Ethik, Ethik-Zentrum; Experteninterview von Frau Dr. Eckhardt (Basler & Hofmann AG) am 8. Oktober 2002

SCHEWE, P., RIORDON, J., STEIN, B. (2002): Terabit-per-Square-Inch Hard Drive Areal Densities. In: Physics News Update 589(2). (http://www.aip.org/enews/physnews/2002/split/589-2.html)

SCHIRRMACHER, F. (Hg.) (2001a): Die Darwin AG. Köln

SCHIRRMACHER, F. (2001b): HALs Erbschaft. In: Schirrmacher 2001a, S. 175–181

SCHLAPBACH, L., ZÜTTEL, A. (2001): Hydrogen-storage materials for mobile applications. In: Nature 414, S. 353–358

SCHULTRICH, B. (2002): SYPO VIII, DPG-Frühjahrstagung Regensburg 2002. In: Verhandl. DPG (VI) 37, S. 513 (B. Schultrich, In: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung, OTTI-Kolleg, Drittes Fachforum Nanotechnologie, 22./23. Oktober 2002, Regensburg)

SCHWALBE, H., GRIESINGER, C. (2002): Auf die dynamische Struktur der Proteine kommt es an. In: FAZ vom 16. Oktober 2002

SEABAUGH, A., HU, Z., LIU, Q. et al. (2000): Silicon-Based Tunnel Diodes and Integrated Circuits. In: 4th International Workshop on Quantum Functional Devices (QFD 2000), Kenzawa (Japan), S. 5–8

SEED (Schlumberger Excellence in Educational Development) (2003): http://www.slb.com/seed/en/watch/fullerenes/smallest.htm (abgerufen 28. April 2003)

SEEMAN, N. C. (1999): DNA engineering and its application to nanotechnology. In: Trends in Biotechnology 17, S. 437–443

SEGBERS, K., IMBUSCH, K. (2001): Designing Human Beings? Politikwissenschaftliche Annäherungen an eine neue Leitwissenschaft („Life Science“). In: Osteuropa-Institut der Freien Universität Berlin, Heft 33, Berlin

SEGELKEN, R. (1999): NSF funding helps launch Cornell’s new Nanobiotechnology Center. In: Cornell Cronicle vom 8. Dezember 1999 (http://www.news.cornell.edu/Chronicle/99/8.12.99/nanobiotech.html)

SHARPE, M. (2001): Analysts in Miniature. In: J. Environ. Monit. 3, S. 51N–55N

SHARPE, M. (2002): A small new World: the Promise of molecular environmental science. In: J. Environ. Monit. 4, S. 49N–52N

SHOR, P. W. (1994): Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring. In: Proceedings, 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Santa Fe, NM, November 20–22, 1994: IEEE Computer Society Press, S. 124–134

SIEMENS (2003): http://bankgesellschaft.de/vowi/11_bln_bbg/04_vergl/04_kompetenz/be_br_produktion.pdf

SKYEPHARMA (2000): Pressemitteilung vom 18. Januar 2000

SMALLEY, R. E. (1999): US Congress testimony (http://www.house.gov/science/smalley_062299.htm; abgerufen am 28. April 2003)

SMALLEY, R. E. (2001): Nanotechnology, Education, and the Fear of Nanobots. In: Roco, M.C., Bainbridge, W. S. (Hg.): Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology, S. 116

SMITH, R. A., AHMED, H. (1997): Gate controlled Coulomb blockade effects in the conduction of a quantum wire. In: Journal of Applied Physics 81(6), S. 1699–2703

SMITH, W. C. (2002): Nanotechnology: the next „revolution“ in textiles? In: Textiles a Usages Techniques 44

SOONG, R. K., BACHAND, G. D., NEVES, H. P. (2000): Powering an Inorganic Nanodevice with a Biomolecular Motor. In: Science 290, S. 1555–1558

SPEICHER, C. (2002): Ein Labor auf einem Chip. In: Neue Zürcher Zeitung vom 9. Oktober 2002

SPRINGER, M. (2001): Stanislaw Lem, der ironische Nano-Prophet. In: Spektrum der Wissenschaft Spezial 2 (Nanotechnologie), S. 80

STEANE, A. M. (1998): Quantum Computing. In: Reports on Progress in Physics 61(2), S. 117–173

STEANE, A. M., RIEFFEL, E. G. (2000): Beyond Bits: The Future of Quantum Information Processing. In: IEEE Computer 33(1), S. 38–45

STEIN, J. (1999): Der Mainstream der Zukunft: CMOS. Die Herausforderungen zukünftiger Nanoelektronik-Generationen. In: RWTH Themen 1/1999, S. 27–30

STIKEMANN, A. (2002): Nanobiotech makes the Diagnosis. In: Tech. Rev. 5

STILWELL, D. et al. (2000): NASA Life Sciences and Space Medicine Requirements for Nanotechnology. Advanced Technology Integration Group at NASA JSC, Entwurf vom 13. September 2000 (http://advtech.jsc.nasa.gov/downloads/NanoNeeds.pdf; abgerufen am 31. Juli 2002)

STUART, C. (2002): Frontline Nanotech Revolutionaries Tell How They’re Changing The World In Small Times. (http://www.smalltimes.com/documentdisplay.cfm?documentid=3846; abgerufen am 14. April 2003)

STURMA, D. (2001): Person und Menschenrechte. In: Sturma, D. (Hg.): Person. Philosophiegeschichte – Theoretische Philosophie – Praktische Philosophie. Paderborn

SUSTECH (2002): Biokomposite. (http://www.sustech.de/D_Projekt5.html; abgerufen am 20. August 2002)

SUVA (Schweizerische Unfallversicherungsanstalt) (1998): Asbest und andere faserförmige Arbeitsstoffe – Gesundheitsgefährdung und Schutzmaßnahmen. Luzern

SVT (Schweizerische Vereinigung von Textilfachleuten) (2001): High-Tech für High-Tex. In: Mittex 3/01

TAN, C. K., BLACKWOOD, D. J. (2003): Corrosion protection by multilayered conducting polymer coatings. In: Corrosion Science 45(3), S. 545–557

TANS, S. J., VERSHUEREN, A. R. M., DEKKER, C. (1998): Room Temperature Transistor Based on a Single Carbon Nanotube. In: Nature 393, S. 49–52

TARASCON, J.-M., ARMAND, M. (2001): Issues and challenger facing rechargeable lithium batteries. In: Nature 414, S. 359–367

TEXTOR, T., BAHNERS, T., SCHOLLMEYER, E. (2001): Funktionelle (adaptive) Schichtsysteme für Bautextilien. In: Technische Textilien 44

TEXTOR, T., BAHNERS, T., SCHOLLMEYER, E. (2002): Anorganisch-organische Hybridpolymere zum Schutz technischer Textilien. In: Technische Textilien 45

THE BRITISH COUNCIL (2002): Nanotechnology. Briefing Sheet Nr. 13, London

THE INSTITUTE OF NANOTECHNOLOGY (2002a): Nanotechnology Reports. (http://www.nano.org.uk/thisweek16.htm)

THE INSTITUTE OF NANOTECHNOLOGY (2002b): NASA establishes seven University Research Engineering and Technology Institutes. (http://www.nano.org.uk/us3cd.htm)

THYSSEN-SOLARTEC (o. J.): http://www.thyssen-solartec.de

TOLLES, W. (2001): Security Aspects of Nanotechnology. In: Roco, M.C., Bainbridge, W.S. (Hg.): Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology, S. 173–187

TOMKIEWICZ, M. (2000): Scaling Properties in Photocatalysis. In: Catalysis Today 58, S. 115–123

TRONG ON, D., DESPLANTIER-GISCARD, D., DANUMAH, C., KALIAGUINE, S. (2001): Perspectives in Catalytic Applications of Mesostructured Materials. In: Applied Catalysis A 222, S. 299–357

UK CENTRE FOR TISSUE ENGINEERING (2001): http://www.ukcte.org/index.htm

ULBRICHT, M. et al. (2002): Novel Molecularly Imprinted Polymer (MIP) Composite Membranes Via Controlled Surface and Pore Functionalizations. In: Desalination 149, S. 293–295

UNIVERSITÄT GRONINGEN (1997): Materials Science Centre, Annual Report 1997. (http://www.rugth30.phys.rug.nl/msc_newweb/reports/1997.pdf)

VAN DER WAGT, J. P. A. (1999): Tunnelling-Based SRAM. In: Proceedings of the IEEE 87(4), S. 571–595

VDA (Verband der Automobilindustrie e.V.) (2002): Jahresbericht „Auto 2002“. Frankfurt a. M.

VDI (2002): Nanotechnik im Automobilbau. VDI-Sondersymposium, 13. März 2002, Mannheim

VDI (1998): Technologieanalyse: Nanoröhren, Technologiefrüherkennung (Autoren: Hoffschulz, H., Otto, J. W., Eickenbusch, H.). VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, Abteilung Zukünftige Technologien, Düsseldorf

VDI-TZ (Hg.) (1997): XMR-Technologien (Autor: Mengel, S.). Düsseldorf

VDI-TZ (2002): Nanobiotechnologie I: Grundlagen und Anwendungen molekularer, funktionaler Biosysteme.

Technologieanalyse. VDI-Technologiezentrum, Schriftenreihe Zukünftige Technologien Nr. 38, Düsseldorf

VEDRAL, V., PLENIO, M. B. (1998): Basics of Quantum Computation. In: Progress in Quantum Electronics 22, S. 1–39

VENKATASUBRAMANIAN, R. (2002): Nano-structured Thermoelectric Materials. 8th Diesel Engine Emissions Reduction Conference, Loews Coronado Bay Resort, August 25, 2002, San Diego

VIDYASANKAR, S., ARNOLD, F. H. (1995): Molecular Imprinting – Selective Materials for Separations, Sensors and Catalysis. In: Current Opinion in Biotechnology 6, S. 218–224

VILGIS, T. A., HEINRICH, G. (2001): Die Physik des Autoreifens. In: Physikalische Blätter 57(6), S. 67–73

VISTA VERDE (2002): Schwermetalle: Aus dem Bergbau in die Flüsse. (http://www.etcgroup.org/article.asp?newsid=399; abgerufen am 22. Juli 2003)

VOGEL, V. (2001): Societal Impacts of Nanotechnology in Education and Medicine. In: Roco, M. C., Bainbridge, W. S. (Hg.): Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology. S. 143–148

VOLLRATH, K. (2002): Schöne neue Nano-Welt. In: Automobil-Industrie 1–2/2002

VON DER WEIDEN, S. (2002): Entzauberter Lotus – Nanotechnik im Auto. In: VDI-Nachrichten vom 31. Mai 2002

WADE, W., MERRITT, R. (2000): DDR-II fuels fires of DRAM debate. In: EE Times, 28. Januar 2000 (http://www.eet.com/story/OEG20000128S0063)

WANT, R., BORRIELLO, G. (2000): IEEE Computer Graphics and Applications 20(3) (Special Issue on Information Appliances)

WASER, R. (2003): Entwicklungsperspektiven und gesellschaftliche Relevanz der Nanoelektronik (in prep.)

WECKER, J., KINDER, R., RICHTER, R. (2002): Sandwiches mit riesigem Magnetwiderstand. In: Physik in unserer Zeit 33, S. 210–216

WECKER, J., MÜLLER, G. (2001): Magnetoelektronik: Teilvorhaben MRAM. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Siemens AG, Corporate Technology, Erlangen

WEISER, M. (1991): The Computer for the 21st Century. In: Scientific American 265 (3), S. 66–75

WEISER, M. (1996): Interview im Rahmen der Sendung „Nanotopia – die kleinste aller möglichen Welten“. In: Süddeutscher Rundfunk, 13. Oktober 1996 (http://www.transhuman.de/nanotopia1.htm; abgerufen am 11. September 2002)

WELLER, H. (2003): http://www.chemie.uni-hamburg.de/pc/Weller/ (abgerufen am 28. April 2003)

WHITE HOUSE (OFFICE OF THE PRESS SECRETARY) (2000): National Nanotechnology Initiative: Leading to the Next Industrial Revolution. Presseinformation 21. Januar 2000 (http://clinton4.nara.gov/textonly/WH/New/html/200001214.html; abgerufen am 4. April 2003)

WHITESIDES, G. M. (2001): Lernen von der ältesten Nanomaschine. In: Spektrum der Wissenschaft Spezial 2 (Nanotechnologie)

WINFREE, E., LIU, F., WENZLER, L. A., SEEMAN, N. C. (1998): Design and self-assembly of two-dimensional DNA crystals. In: Nature 394, S. 539–544

WINKLER, J., PROFT, B. (2002): Vor UV schützen und selektiv blaues Licht streuen. In: Sachtleben-Fach-Publikationen 9/2001

WINTER, J. O., LIU, T. Y., KORGEL, B. A., SCHMIDT, C. E. (2001): Recognition Molecule Directed Interfacing Between Semiconductor Quantum Dots and Nerve Cells. In: Adv. Mater. 13(22), S. 1673–1677

WOERMANN (2003): Ultrafein. (http://www.woermann.com)

WOLF, S. A., AWSCHALOM, D. D., BUHRMAN, R. A., DAUGHTON, J. M., VON MOLNÁR, S., ROUKES, M. L., CHTCHELKANOVA, A. Y., TREGER, D. M. (2001): Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future. In: Science 294, S. 1488–1495

YABLONOVITCH, E. (2002): Halbleiter für Lichtstrahlen. In: Spektrum der Wissenschaft 4, S. 66–72

YAHOO (2003): http://de.news.yahoo.com/030225/295/3b9nz.html (abgerufen am 25. Februar 2003)

YANO, K., ISHII, T., HASIMOTO, T. et al. (1995): Transport characteristics of polycrystalline silicon with influence by single electron charging at room temperature. In: Applied Physical Letters 67(2), S. 828–830

ZANDONELLA, C. (2001): Quantum Dots to barcode DNA. In: New Scientist 2. Juli 2001 (http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns9999953; abgerufen am 30. Juli 2002)

ZIMMER, R. (1999): Ein universeller DNA-Computer. In: GMD-Spiegel 3/4, S. 24–28

ZOCCHI, G. (2001): Skin-Feel Agents. In: Barel, A. O. et al. (Hg.): Handbook of Cosmetic Science and Technology. New York

Anhang

1. Tabellenverzeichnis

2. Abbildungsverzeichnis

Seite

3. Tabellarische Übersicht ausgewählter nanotechnologiebasierter Produkte

Anhang 1

Oberflächenfunktionalisierung und -veredelung

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
mechanische Eigenschaften						
tribologische Schichten für (Stanz-, Umform-, Schneid-) Werkzeuge, Lager	Hartstoffschichten	Oxide (Al_2O_3); Nichtoxid. Hartstoffe (TiN, TiC, TiCN, Si_3N_4, …)	ultradünne Schichten	Gasphasen-abscheidung	Maschinenbau Fahrzeugbau	Anwendung
	Hartstoff-Nanokompositschichten	Oxide (Al_2O_3); Nichtoxid. Hartstoffe (TiN, TiC, TiCN, Si_3N_4, …)	Nanokomposit: Nanokristallite und Nanopartikel in amorpher Matrix	Gasphasen-abscheidung		Anwendung
	Keramik-Metall-Nanokompositschichten	Oxid- und Nichtoxid-keramik-Partikel in Metallmatrix (Cu, W u. a.)	Nanokomposit: Nanokristallite und Nanopartikel in amorpher Matrix	Gasflusssputtern		Entwicklung
	superharte C-Schichten und C-Vielfachschichten	amorpher Kohlenstoff (DLC (a-C:H, ta-C), …)	ultradünne Schichten Nanokristallite in amorpher Matrix; Nanozwiebeln/ -zylinder in amorpher Matrix	PECVD; Vakuumbogen (Arc), mit Edelgaszufuhr (Nanozwiebeln); Schwerionen-beschuss (Nanozylinder)		Anwendung (Diamor®, SICON®); Forschung (Nanozwiebeln …)
Festplatten-C-Topschichten	Korrosionsschutz und Tribologie	Kohlenstoff (DLC/a-C:H; a-Diamant/ta-C)	ultradünne Schichten Nanokristallite in amorpher Matrix	PECVD; Vakuumbogen (Arc)	I u. K	Anwendung
mechanische Schutzschichten auf Soft Materials	Oxidschichten auf Polymeren, Holz, Papier, Textilien	Oxide (SiO_2, …)	ultradünne Schichten Nanoporen	Sol-Gel-Verf.	Verpackung Bautechnik Papier …	
Kratzschutzbeschichtung auf Polymeren (Brillengläser), Metallen, Leder	anorganisch-organische Hybridpolymere (organisch modifizierte Keramiken)	anorganisch-organische Hybridpolymere (organisch modifizierte Keramiken)	Nanodomänen	Sol-Gel-Verf., ggf. UV-Aushärtung	Fahrzeugbau Textil	Anwendung (Ormocere®/ Nanomere®)

noch Anhang 1

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
antiadhäsive Schichten	Gleitschichten für Alpinsport, Anti-Graffiti-Schichten, Anti-Fouling-Schichten	Polymere (z. B. ω-fluorierte Tenside)	ultradünne Schichten, supramolek. Aggregate	Selbstorganisation …	Konsumgüter Bautechnik Schiffbau	
tintenstrahldruckbare strukturierbare mechanische Schutzschichten/ Keramikpulver	z. B. für Rasiermesserkanten z. B. für Rapid Prototyping	Oxide (TiO_2, ZrO_2, Al_2O_3) (ZrO_2)	Nanokristalle/wässr. Nanosuspension; inverse Mikroemulsion	Elektrolyse von Metallchloriden; Selbstorganisation	Konsumgüter u. div. a.	Entwicklung ruht Entwicklung
schlaggeschützte Fensterscheiben	Verbundschicht (Verbindungsschicht) zw. Glasscheiben	Polymere (PU, …)	ultradünne Schicht		Fahrzeugtechnik Bautechnik	Anwendung
Poliermittel (Abrasiva)	für chem.-mech. Polieren (CMP) von Si-Wafern	Oxid (TiO_2)	Nanokristalle	Flammhydrolyse	I u. K	Anwendung
verschiebbare Folien	variable Belegung von Glas- oder Kunststoffoberflächen		Partikel oder Nanoröhren in der Grenzschicht	Sol-Gel, PVD, CVD, …	Fahrzeugtechnik	Forschung
thermische und chemische Schutzschichten						
thermische Schutzschichten	Turbinen, Motoren	nichtoxidische Keramiken; Mullitbasis-Keramiken; Intermetallische Legierungen	Nanodispersion/ -komposite oder ultradünne Schichten	Gasphasenabscheidg. (MOCVD, PACVD, PVD); Sol-Gel-Verf.; (elektrophoretische Abscheidung)	Luft- & Raumf. Fahrzeugbau	F/E/Anwendung
thermomechanische Schutzschichten	Turbinen, Motoren	nichtoxidische Keramiken; Mullitbasis-Keramiken; intermetallische Legierungen	Nanodispersion/ -komposite oder ultradünne Schichten	Gasphasenabscheidg. (MOCVD, PACVD, PVD); Sol-Gel-Verf.; (elektrophoretische Abscheidung)	Luft- & Raumf. Fahrzeugbau	F/E/Anwendung

noch Anhang 1

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
wärmedämmende Fensterscheiben	vis-transparent und wärmedämmend	Glas- oder Keramik-Aerogele	Nanoporen (Nanoschäume)	Sol-Gel-Verf. u. superkrit. Trocknen	Bautechnik Fahrzeugtechnik	Entwicklung
chemische Schutzschichten (Korrosionsschutz in aggressiven Medien)	(Pumpen, Ventile, Rohre, Reaktoren, Stahlarmierung, Sonderfasern)	Ti-Carbid, Ti-Carbonitrid u. a.	ultradünne Schichten (ggf. aus Nanopartikeln)	Gasphasenabscheidg.; elektrochem. Abscheidung; (Sol-Gel-Verf.; Tauchverfahren)	Chemische Ind.; Medizin; Bautechnik; (Textil)	
chemische Schutzschichten (Korrosionsschutz)	interpenetrierende organisch/anorganische Netzwerke	anorganisch-organische Hybridpolymere (organisch modifizierte Keramiken)	Nanodomänen	Sol-Gel-Verfahren	Fahrzeugtechnik	Entwicklung
Diffusionsschutzschichten für Computerchips	Verhindern von Cu-Eindiffusion in Si	Ti-Nitrid	ultradünne Schichten		I u. K	Anwendung
Schutzschichten gegen Gasdurchtritt	PET-Getränkeflaschen, Lebensmittelverpackungen	Oxide (SiO_2; TiO_2); DLC; anorganisch-organische Hybridpolymere (organisch modifizierte Keramiken)	ultradünne Schichten; Nanodomänen	Gasphasenabscheidg.; Sol-Gel-Verf., ggf. UV-Aushärtung	Lebensmittel	Anwendung
	Lebensmittelverpackungen, Tennisbälle, Autotanks	Silikate (Tonpartikel)/SiO_2 in Polymer	Nanopartikel/ Nanokomposite	Mineralienabbau, Flammhydrolyse, …	Lebensmittel Konsumgüter Fahrzeugbau	Anwendung (Tennisb.); Forschung (Autotanks)
Benetzungsverhalten						
superhydrophobe Schutzschichten	Diamor®; SICON®, gleichzeitig verschleißfest	Kohlenstoff (a-Diamant/ta-C; DLC-F; DLC-Si; …)	ultradünne Schichten, Nanokristallite in amorpher Matrix	Vakuumbogen (Arc), Gasphasenabscheidg.	div.	Anwendung (Diamor®; SICON®)
	auf Polymeren	fluorierte Kohlenwasserstoffe	ultradünne Schichten, MAMs	mechanical assembly	div.	Forschung

noch Anhang 1

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
„selbstreinigende“ Beschichtungen	hydrophob und oleophob, ggf. ultraphob	fluorierte oder mit langkettigen Alkylresten versehene Silikone (= Hybrid-Polymer)	ultradünne Schichten, ggf. mikro-/ nanorau	Sol-Gel-Verf.	Bautechnik Fahrzeugtechnik	Entwicklung
„selbstreinigend“ beschichtete Textilien	hydrophob und oleophob (ggf. ultraphob), dabei gleichzeitig verschleißverringernd	fluorierte oder mit langkettigen Alkylresten versehene Silikone (= Hybrid-Polymer)	ultradünne Schichten	Sol-Gel-Verf.	Textil	Entwicklung/ evtl. schon Anwendung
selbstreinigende Fensterscheiben (Architekturglas)	ultraphob (superhydrophob und superoleophob) und geringe opt. Streuverluste	Oxid (ZrO_2)	ultradünne nanoraue Schicht	z. B. Sol-Gel-Verf.	Bautechnik Energietechnik Fahrzeugtechnik Medizin(Analyt.)	Feldversuch
Verscheibung & Spiegel mit Anti-Beschlag-Effekt	hydrophil	Tenside bzw. OH-Gruppen	einseitig polare Nanoschicht		Fahrzeugtechnik Konsumgüter	Forschung/ Entwicklung
		Oxide (TiO_2)	Nanopartikel			Forschung/ Entwicklung
Oberflächen mit reversibel schaltbaren Benetzungseigenschaften			evtl. supramolekulare Aggregate		Fahrzeugtechnik Medizin	Forschung
Tintenstrahldruckerpapier	hydrophil	Oxid (pyrogene Kieselsäure/Aerosil/ gemischte Oxide Al_2O_3+SiO_2)	amorphe Nanopartikel	Flammhydrolyse	I u. K	Anwendung
biozide Beschichtungen						
antibakterielle/ biozide Schutzschichten auf Metall, Kunststoff, Textil, Anti-Fouling-Schichten	antibakteriell	Polymer (Polyethylenglykol: z. B. plasmapolymeris. Tetraglyme)	ultradünne Schichten	Soft Lithography	Lebensmittelverpackung; Bautechnik (Holzschutz); Medizin (Langzeitkatheter!) Schiffbau	Entwicklung/ Anwendung
	kontrollierte Freisetzung von Bioziden	Oxid (SiO_2)	Nanoporen	Sol-Gel-Verf.		Anwendung

noch Anhang 1

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		**nanobasierter Stoff/ Werkstoff**	**nanoskalige Basisstruktur**	**Herstellung**	**Branche**	**Status**
noch **antibakterielle/ biozide Schutzschichten** auf Metall, Kunststoff, Textil, Anti-Fouling-Schichten	photokatalytische Erzeugung von Hydroxyl-Radikalen (aus Wasser und Sauerstoff)	Oxide (TiO_2/Anatas, evtl. ZnO)	Nanopartikel, ultradünne Schichten	Sol-Gel-Verf., evtl. CVD		Anwendung
antibakterielle Textilien	keimtötende Beschichtung	Polymere	Nanoschichten	z. B. Soft Lithography	Textil Medizin	Entw. Oder Anwendung
	kontrollierte Freisetzung von Bioziden	Oxid (SiO_2; evtl. Al_2O_3)	Nanoporen	Sol-Gel-Verf.; evtl. el.chem.(Eloxal)		Anwendung/ Forschung
optische Eigenschaften						
Antireflexschichten für Fensterscheiben, optische Geräte	Solarzellen, Fassaden, Museumsglas, solarthermische Kollektoren	mikro-/mesoporöses Si; nanoporöse SiO_2-Schicht aus Suspension von Nanopartikeln	Nanoporen (Dichtegradient); Nanoporen aus Nanopartikeln …	Sol-Gel-Verf.	Bautechnik Energietechnik	Anwendung
schaltbar transparente Beschichtungen	Fensterscheiben	Oxid (WO_3)	ultradünne Schicht aus Nanokristallen	div.	Bautechnik Fahrzeugtechnik	Anwendung/ Entwicklung
spektral selektiv transparente Beschichtungen	Solarzellen (keine Aufheizung durch ungenutztes Licht)	Metall (Ag)	Nanokristalle/Cluster	div.	Energietechnik evtl. Bautechnik	
Papier-Weißmacher		Oxide (TiO_2); Silikate (Kaolinit)	Nanopartikel als Schicht	Flammhydrolyse; Abbau u. Aufschlämmen	Konsumgüter	Anwendung
Textilien	Färbung (ggf. Farbeffekte)	Ruß/Kohlenstoff;	Nanopartikel;	Furnace-, Gas-, Flammrußverf.;	Textil	Anwendung
		org./anorg. Farbstoff, Oxid (Matrix)	ultradünne Schichten, Nanokomposite	Sol-Gel-Verf.	Textil	Entwicklung/ Anwendung
elektrische Eigenschaften						

noch Anhang 1

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
optische/elektrische Schichten	transparent (vis) und el. leitfähig (und IR-absorbierend) (antistatisch oder für Touch Screens)	Oxid (ITO) in Polymer (PMMA)	Nanokristalle in Polymermatrix	wahrsch. Flammhydrolyse	I&K Verpackung	
	UV-schützend und elektrisch leitfähig	Oxid (ZnO/ „NANOX“)	Nanokristalle	Flammhydrolyse	I u. K?	Forschung
antistatische Schutzschichten	CNT gegen el.stat. Aufladung	C-Nanoröhren in Ormocermatrix	Nanoröhren, Nanopartikel	Gasphasen-abscheidg. u. Sol-Gel-Verf.	I u. K Fahrzeugbau	Entwicklung
radarabsorbie-rende Beschich-tungen	radarabsorbierend	C-Nanoröhren; Oxide; Cenospheres (ker. Hohlkugeln mit Me-tallnanoschicht)	Nanoröhren; Nano-kristalle; ultradünne Schichten	Gasphasenab-scheidg.; ….; Hüttenindustrie-Abfallprod.	Rüstung Rüstung	Forschung Anwendung
Lacke, Kleber						
Lacke	Farbbrillanz; Farb-ton (Farbtonverschie-bungseffekt); Farb-effekte (Perlglanz, Opaleszenz, Frost-Effekt); reproduzier-bare Farben (durch wohldefinierte Parti-kelgröße/Beschich-tung); gut disper-gierbar (beschichtete SiO_2-Kugeln)	Ruß/Kohlenstoff; Oxide (TiO_2, Fe_2O_3, Fe_3O_4, SiO_2, Cr_2O_3) (auf Glimmer-plättch. od. SiO_2-Ku-geln, mit Metallic-pigmenten)	Nanopartikel-aggregate und -agglomerate; ultradünne Schich-ten; Nanopartikel	Flammrußverf., Degussa-Gasruß-verf.; nasschem. Ab-scheid., SiO_2-Ku-geln: Kolloidchemie	Fahrzeugtechnik Konsumgüter	Anwendung
	selbstreinigend	anorganisch-organische Hybridpolymere (or-ganisch modifizierte Keramiken)	Nanopartikel/ Nanodomänen	Sol-Gel-Verf.	Fahrzeugtechnik	Forschung

noch Anhang 1

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **Lacke**	schaltbar (elektrochrom/photochrom/ thermochrom)	WO_3 (elektrochrom); …	Nanopartikel	div.	Fahrzeugtechnik	Vision/Forschung
	selbstheilend	evtl. Polymer-„Gel“, Ormocere	Oligomere, Polymere, große Moleküle		Fahrzeugtechnik Kosmetik	frühe Entwicklung
	Monolagige Verbindungsschichten z. B. Metall–Lack	Polymere	ultradünne Schichten		Fahrzeugtechnik Konsumgüter	
	Kratzfestigkeit	Oxid (pyrogene Kieselsäure/Aerosil)	amorphe Nanopartikel	Flammhydrolyse	Fahrzeugtechnik I u. K Konsumgüter	Entwicklung
	optimal eingestellte Fließeigenschaften	Oxid (pyrogene Kieselsäure/Aerosil)	amorphe Nanopartikel	Flammhydrolyse	diverse	
	leitfähige Lacke für elektrostatische Sprühlackierung (Einsparung Lack und Lösungsvermittler/VOC)	Kohlenstoff	(Fullerene) Nanoröhren	Gasphasenabscheidung	Fahrzeugtechnik …	Forschung/ Entwicklung
Holzschutzanstriche	TiO_2-Nanokristalle (UV-Schutz)	Oxid (TiO_2/Rutil)	Nanokristalle	Flammhydrolyse	Bautechnik	Anwendung
Kleber	optimal eingestellte Fließeigenschaften	Oxid (pyrogene Kieselsäure/Aerosil)	amorphe Nanopartikel	Flammhydrolyse	Fahrzeugtechnik Konsumgüter?	Anwendung
	Klebstoff mit magnetischen Nanopartikeln, beim Kleben elektromagnetisch aufheizbar → Härtung bzw. reversibel klebbar	Oxid (Magnetit/γ-Fe_3O_4)	Nanopartikel	div.	Fahrzeugtechnik Konsumgüter? Bautechnik?	Forschung
	Silber-Leitkleber	Metall (Ag)	Nanopartikel	div.	Fahrzeugtechnik I u. K	Anwendung

noch Anhang 1

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System	nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
Textilien					
Textilien klimaregulierend/ atmungsaktiv		Partikel auf Faseroberflächen	div.	Fahrzeugtechnik Textil/Bekleidg.	erste Anwendungen

Quelle: INT 2003 (verändert)

Anhang 2

Katalyse, Chemie und Werkstoffsynthese

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
Katalysatoren	Nanopartikel-Katalysatoren	Metalle, Halbleiter, Carbide/ Oxycarbide,	Nanokristalle, Cluster	Fällung, Sol-Gel-Verf., …	Chemie Fahrzeugtechnik Umwelttechnik	Forschung/Entwicklung/Anwendung (Abgaskat. 30 Jahre)
	Nanopartikel-Photokatalysatoren, v. a. zur Wasseraufbereitung sowie zur Beseitigung von Umweltgiften und Pharmaabfällen	Oxide (z. B. TiO_2/ Anatas, auch Ü-Metall-dotiert), Metalle (Ag)	Nanokristalle, Cluster	Fällung, Sol-Gel-Verf., …	Umwelttechnik Chemie	Entwicklung/ Anwendung
	Zeolithe als Katalysatoren, v. a. in der Petrochemie	Kieselsäuren (Zeolithe)	Nanoporen	Selbstorganisation in wässriger Lösung	Chemie Umwelttechnik? Fahrzeugtechnik	Anwendung Fahrzeugtechnik: Forschung
	C-Nanofilamente, -Nanoröhren, -Nanozwiebeln als Katalysatoren für oxidative Dehydrierung (nichtplanarer sp^2-C)	Kohlenstoff (OLC, CNF, CNT)	Nanozwiebeln Nanofilamente Nanoröhren	katalytische CVD	Chemie (Styrol-Synthese)	Forschung
	Molecularly Imprinted Polymers (MIPs)	Polymere; Oxide (anorg. Polymere)	Nanoporen	Molecular Imprinting (Vernetzung anorg. durch Sol-Gel-Verfahren)	Chemie Medizin/Pharma Umwelttechnik	Forschung/ Entwicklung/ Anwendung
	nanoporöse Träger	Zeolithe; Aerogele; durch Interkalation (Pillaring) „gespreizte“ Schichtstrukturen (z. B. Tone); oxidische/keramische Membranen; metallische Membranen; künstl. Opale aus monodispersen SiO_2-Kugeln; (Carbosilan-) Dendrimere	Nanoporen (Schwämme) Moleküle	Schlickerguss (Makr./Mes.) Strangpressen (Mes.) Sol-Gel-Verf. (Mikr.) Elektrooxid. v. Met. (Eloxal); Kolloidchemie; org.-chem. Synth.; …	Chemie Fahrzeugtechnik Umwelttechnik	Forschung/ Entwicklung/ Anwendung

noch Anhang 2

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **Katalysatoren**	Nanoreaktoren	org. Moleküle (Lipide, Polyelektro-lyten), Polymere; Oxide (Zeolithe…); (Carbosilan-) Dendrimere	Supramolek. Aggregate: Nanokap-seln, Vesikel, Micel-len; Nanoporen; Moleküle; (Sonochemie: Nanokavitäten)	Selbstorganisation; Ink-Jet-Printing, Lithographic Printing, Selbstorganisation in wässriger Lösung ; org.-chem. Synth.	Chemie	Forschung/ Entwicklung/ Anwendung
	Biokatalysatoren, Biofilter: immobili-sierte Enzyme oder Mikroorganismen („Biocere“)	Oxid (SiO_2) (Biomoleküle)	Nanoporen, ultradünne Schichten	Sol-Gel-Verfahren	Biotechnologie Medizin Umwelttechnik	Anwendung
Molekularsiebe	(Chemische Indus-trie, Wasserauf-bereitung, Lebens-mittelindustrie, Biotechnologie) (aggressive Reini-gungsmittel und hohe T möglich)	Silikate (Zeolithe); künstl. Opale aus monodispersen SiO_2-Kugeln	gesinterte Nanopartikel, Nanoporen	Selbstorganisation Kolloidchemie	Chemie Umwelttechnik Lebensmittelind.	seit langem Anwendung
Ultrafiltrations-membranen	(Gas, Flüssigkeit) (Chemische Indus-trie, Wasserauf-bereitung, Lebens-mittelindustrie, Biotechnologie)	Polymere (PET-, PC-Membr.);	Nanoporen	Ionenbeschuss u. Ätzen, Selbstorganisation, …	Chemie Umwelttechnik Lebensmittelind.	Anwendung
	Affinitätsfiltration mit MIP-beschichte-ten Polymermem-branen	Polymere	Nanoporen	Molecular Imprinting	Umwelttechnik Chemie Medizin/Pharma	Forschung
Chromatographie-materialien	Säulenmaterial/ stationäre Phase „Chromolith“	Oxid (SiO_2)	Nanoporen, Nanokristalle	Sol-Gel-Verf.	Umwelttechnik Chemie Medizin/Pharma	Anwendung
	Molecularly Imprinted Polymers (MIPs)	Polymere	Nanoporen	Molecular Imprinting	Umwelttechnik Chemie Medizin/Pharma	Forschung/ Entwicklung/ Anwendung

noch Anhang 2

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
Kohlenwasserstoff-Adsorber	Kfz-Abgasreinigung (Kaltstart mit Abgas-katalysator)	Silikate (Zeolithe)	Nanoporen (Schwämme)	Selbstorganisation in wässriger Lösung	Fahrzeugtechnik	Entwicklung
Ionenaustauscher		Silikate (Zeolithe), …	Nanoporen	Selbstorganisation in wässriger Lösung, …	Umwelttechnik Chemie Medizin/Pharma	Anwendung
Entschäumer		Oxid (TiO_2, SiO_2)	Nanokristalle	Flammhydrolyse	Pharma/Medizin Chemie	Anwendung

Quelle: INT 2003 (verändert)

Anhang 3

Energiewandlung und -nutzung

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
Farbstoff-Solarzellen	Halbleiter (nanokrist.-gesintert)	Oxidkeramik (TiO_2/Anatas)	Nanokrist. (gesint.)	Flammhydrolyse, Siebdruck, Sintern	Energietechnik Bautechnik Fahrzeugtechnik Luft- u. Raumfahrt	Forschung/ Entwicklung
	Farbstoff (monomolek. Schicht)	metallorgan. Verb.	monomol. Schicht	Adsorption aus Lösung		
	HL-Quantenpunkte als Farbstoff	Verb.-Halbleiter	Nanokrist./Cluster	z. B. Sol-Gel		
	anisotrope Nanostrukturierung des Elektrolytraums/des Lochleiters (mit polymerem Lochleiter: „Hybrid-organ./anorgan. Festkörper-Solarzelle“)	Oxid (ZrO_2) u. a. org. Moleküle …	Nanostäbe, anorg. Nanoröhren, supramolek. Strukt., Nanoporen	Selbstorganisation, Lithographie		
	Kathode (nanokrist. Pt)	Metall (Pt)	Nanokristalle	elektrochemisch, Siebdruck, Sintern		
Polymer-Solarzellen	Nanophasensepariertes System (Bulk Heterojunction) aus halbleitendem Polymer als é-Donor und Fullerenderivat als é-Akzeptor	Polymer, organ. Fullerenverb.	Nanoporen/ Nanopartikel/ Nanonetzwerk / Fullerene		Energietechnik Bautechnik Fahrzeugtechnik	Forschung
	Metallcluster als é-Donor (Ag) („Hybrid-organ./ anorgan. Solarzelle“)	Metall (Ag)	Cluster	div.		
	CdSe-Nanopartikel als e-Akzeptor („Hybrid-organ./ anorgan. Solarzelle“)	Verb.-Halbleiter (CdSe)´	Nanopartikel	Kolloidchemie		

noch Anhang 3

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **Polymer-Solarzellen**	Elektronentransporter (wenn anorg.: „Hybrid-organ./anorgan. Festkörper-Solarzelle“)	Verb.-Halbleiter (CIS, CdSe), organ. Verb. (Coronen, Perylen, …)	anorg. Nanokrist., anorg. Nanoröhren, supramolek. Strukt. (diskot. Flüss.-krist., …)	div. Selbstorganisation		
	nanostrukturierte Rückelektrode	Metallschicht (Al) auf nanostrukt. Polymer	laterale Nanostruktur	(Soft) Lithographie		
Verbindungshalbleiter-Dünnschicht-Solarzellen	Quantenpunkt-Solarzellen	Verbindungshalbleiter (III-V, II-VI, CIS)	Nanokrist./Cluster	div.	Energietechnik Bautechnik Fahrzeugtechnik	Forschung
	Quantentrog-Solarzellen		ultradünne Schichten	CVD /MBE		Entwicklung
	Nanopartikel als Precursor		Nanokristalle	div.		
	ultradünne Zwischenschichten		ultradünne Schichten	CVD /MBE		
Si-Solarzellen	Nanodispers. als Kontaktprecursor		Nanokristalle/ Nanosuspensionen	div.	Energietechnik Bautechnik Fahrzeugtechnik Raumfahrt	
	Back-Surface-Field-Nanoschichten	Halbleiter	ultradünne Schichten	div.		
	25µm dicke c-Si-Solarzellen	Halbleiter (mesoporöses Si)	Nanoporen	Ätzen …		Entwicklung
thermoelektrische Konverter	Thermogeneratoren und Peltierelemente	InGaAs,GaSb, SiGe Bi_2Te_3, Sb_2Te_3	Partikel ultradünne Schichten	div.	Fahrzeugtechnik Klimatechnik Luft- u. Raumfahrt Energietechnik Konsumgüter	Prototypen
Brennstoffzellen	nanoporöse Katalysatoren	Platinmetalle (Pt, Ru)	Nanopartikel		Energietechnik Fahrzeugtechnik	Entwicklung

noch Anhang 3

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **Brennstoffzellen**	Nanokeramik-Feststoffelektrolyt-Membranen für verbesserte Ionenleitfähigkeit (solid-oxide fuel cell = SOFC)	Keramik (z. B. Y-stabil. ZrO_2 = YSZ)	gesinterte Nanopartikel	div.		Anwendung
	Polymermembran für Direkt-Methanol-Brennstoffzelle: H_2O-, nicht aber CH_3OH-durchlässig (Polymerelektrolytmembran-BrZe = PEM-FC)	Polymer	Nanoporen	div.		Forschung
	Membran aus mit Imidazolderivaten beschichteten Nanopartikeln für Direkt-Methanol-Brennstoffzellen zur wasserfreien Protonenleitung (Polymerelektrolytmembran-BrZe = PEM-FC)	org. Moleküle, Polymer (Nafion®)	ultradünne Schicht auf Polymer-Nanopartikeln			Forschung
Wasserstoffspeicher	Nanoröhren, Fullerenderivate	C-Nanoröhren	Nanoröhren	Gasabscheideverf.	Energietechnik Fahrzeugtechnik Luft- u. Raumfahrt	Forschung
	nanoporöse Metallhydride	(Leicht-) Metall (Mg-B-Hydrid)	Nanoporen			Forschung
Batterien	nanoporöse Elektroden	Carbonaerogele	Nanoporen		Energietechnik Fahrzeugtechnik Luft- u. Raumfahrt	

n o c h Anhang 3

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **Batterien**	Separatoren aus flexiblen keramischen Membranfolien	Keramik	Nanoporen			Forschung
	Li-Batterien mit elektrochemischer Interkalation von Li in CNT	C-Nanoröhren	Nanoröhren	Gasabscheide-verfahren		Forschung
Super-kondensatoren	nanoporöse Elektroden, Nanowhisker aus Nanoröhren	Carbonaerogele, Nanoröhren	Nanoporen, Nanoröhren		Energietechnik	Entwicklung/ Anwendung
	Multilagen-Keramik-kondensatoren (MLCC): aus Nanopartikeln gesinterte Elektroden	Metalle (Ni, Fe), Nitride, Carbide der Übergangsmetalle	Nanopartikel	div.	I u. K	Entwicklung
Supraleiter	Nanoröhren, Fullerene	C-Nanoröhren, Fullerene	Nanoröhren, Fullerene	Gasphasenabscheide-verfahren	Energietechnik Medizin (Analytik)	Forschung
	CeO_2-Nanoschichten Bestandteil von YBCO-Kabeln	Oxid (CeO_2)	ultradünne Schichten	z. B. Gasphasen-abscheidung		Anwendung
keramische Heizungszünder		SiC	Nanokeramik, Nanokristalle	div. u. Spritzguss u. druckloses Sintern	Energietechnik	Anwendung
Glühkerzen (Dieselmotor)		Si-basierte nicht-oxid. Keramik	Nanopartikel in amorpher Keramik	Polymerpyrolyse	Fahrzeugtechnik	Anwendung
Nanospitzen für Feldemissions-schalter	Zündanlagen	Piezokeramiken	Spitzen mit Nanoabmessungen		Fahrzeugtechnik	Anwendung
Kühlflüssigkeiten	erhöhte Wärme-kapazität	u. a. Kupfer (C-Nanoröhren?)	Partikel (Nanoröhren)		Energietechnik, Fahrzeugtechnik	Entwicklung
Nanojets	Einspritzsysteme (Motoren)		Nanokanäle	Selbstorganisation	Fahrzeugtechnik	Forschung

noch Anhang 3

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
Kraftstoffadditive	katalyt. Kraftstoffzusätze; z. B. CeO_2 zur Rußverbrennung in Diesel-Abgasfiltern	… z. B. Oxide (CeO_2)	Nanopartikel	div.	Fahrzeugtechnik	Entwicklung
Treibmittel / energetische Werkstoffe	Airbag, Feststoffrakete, Flugzeug-Kraftstoff-Additive (Oktanzahlerhöhung), Sprengstoffe	polymer- oder Al_2O_3-beschichtete Al-Nanopartikel	ultradünne Schicht auf Nanopartikel	Inertgaskondensation …	Fahrzeugtechnik Luft- u. Raumf. Rüstung	Entwicklung
Schmierstoffe	MoS_2-„Fullerene“	Übergangsmetall-chalkogenid	anorg. Fullerene	Selbstorganisation	Fahrzeugtechnik ggf. Luft- u. Raumfahrt	
	metall. Zusätze in techn. Ölen	Metalle	Nanopartikel	diverse	Fahrzeugtechnik	Anwendung
Wärmedämmung von Hauswänden	Vakuumisolationspaneele	Glas-Aerogel	Nanoporen (Schäume)	Sol-Gel-Verf.	Bautechnik	Pilotfassade
transparente Wärmedämmung (TWD) von Hauswänden	Aerogelgranulat-gefüllte Verglasungen (Wand dahinter absorbierend beschichtet)	Glas-Aerogel	Nanoporen (Schäume)	Sol-Gel-Verf.	Bautechnik	Pilotfassade
wärmedämmende Fenster		Glas-Aerogel	Nanoporen (Schäume)	Sol-Gel-Verf.	Bautechnik	Entwicklung

Quelle: INT 2003 (verändert)

Anhang 4

Konstruktion

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
Leichtbaukonstruktionen (Land-, Luft, Raumfahrzeuge)	CNT-verstärkte Werkstoffe	Kohlenstoff	Fullerene, Nanoröhren	Gasabscheidung	Fahrzeugtechnik Luft- u. Raumfahrt	Forschung
	partikelverstärkte Metalle & Legierungen	Keramiken	Nanopartikel	div.		Entwicklung
hochtemperaturfeste Leichtbaukonstruktionen: Flugzeugturbinen, Pleuelstangen, Ventile, Turbolader	intermetallische Verbindungen	intermet. Verb./ Metall (γ-TiAl /ξ-Ti_5Si_3)	Nanokristalle/ Nanokomposit als warmumformbarer Precursor für Mikrokomposit	Hochenergiemahlen u. isostatisches Pressen, anschl. Tempern (Rekrist.)	Fahrzeugtechnik Luft- u. Raumf. Wehrtechnik	Forschung/ Entwicklung
superplastische Werkstoffe	Warmumformen/ Heißschmieden	Keramiken; intermetallische Verbindungen; Hartmetalle	Nanopartikel/ Nanokristalle/ Nanokomposite	Nanopartikelherstellg. u. isostatisches Pressen u. Nachbehandlung	Fahrzeugtechnik Luft- u. Raumf. Energietechnik Maschinenbau	
Baustoffe	nanoskalige Beton-Zuschlagstoffe (z. B. „Nanosilica“, „Mikrosilica“)	Oxid (SiO_2)	Nanopartikel	aus Filterstäuben, Flammpyrolyse	Bautechnik	Anwendung
	Polymer-Zuschläge für Zementbasiswerkstoffe	Polymere	Nanopartikel	n. bek.		Anwendung
Verkleidungen, Armaturen, Gehäuse	nanopart.verstärkte und -gefärbte Thermoplaste	Ruße, mineral. Naturstoffe (Tone) (in Polymermatrix)	Nanopartikel	Furnacerußverf.; natürl. Vorkommen (Baggern)	Fahrzeugtechnik I u. K Konsumgüter	Anwendung
Fahrzeugreifen (Partikel) Dichtungen, Puffer, Lager	(Ruß, Silikate) (partikelverstärkte Elastomere)	Ruße, SiO_2 (in Polymermatrix)	Nanokristalle/ Nanopartikel (Nanokomposit)	Flammenverfahren	Fahrzeugtechnik Luft- u. Raumf.	Anwendung
Bauteile für medizinische Geräte, Babysauger	partikelverstärkte Elastomere	Oxid (pyrogene Kieselsäure/Aerosil)	amorphe Nanopartikel (Nanokomposit)	Flammhydrolyse	Medizin etc.	Anwendung

noch Anhang 4

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
Bauteile für Raketen-Triebwerke	hochtemperaturfeste partikelverstärkte Elastomere	(Edel-) Metall (Ag); Oxid (SiO_2)	Nanopartikel (Nanokomposit)	Red. von AgCl / Hydrolyse von Si-Alkoxid in Nylon-6	Luft- u. Raumfahrt	Anwendung
Golfschläger-Inlays	partiell krist. metallische Gläser	Metalle, teilkristallisierte metall. Gläser	Nanokomposit aus metall. Nanokristalliten in amorpher Metallmatrix	partielle Nanokristallisation	Konsumgüter	Entwicklung/ Anwendung
zusätzliche Funktionalisierung von Konstruktionswerkstoffen						
antistatische Textilien	Bezugstoffe, Bekleidungsstoffe	Kohlenstoff (Ruße)	gesinterte Nanopartikel	Flammenverfahren	Fahrzeugtechnik Textil/Bekleidung	erste Anwendungen
geruchsreduzierende Textilien	Cyclodextrine absorbieren Geruchsstoffe	organ. Moleküle (Cyclodextrine)	Moleküle/ Nanoporen/ supramol. Aggregate	Biotechnologie	Textil/Bekleidung	Forschung
transparente Leichtbauwerkstoffe	Verscheibungen		Fasern; Partikel		Fahrzeugtechnik	frühe Forschung
farbiges Glas	Kirchenfenster, Gebrauchsglas, …	(Edel-) Metalle (Au, Ag, Cu)	Nanopartikel/Cluster	mittelalterl. Prozesse nicht völlig aufgeklärt Sol-Gel, Ionenimpl.	Bautechnik Konsumgüter	Anwendung mind. seit Römerzeit

Quelle: INT 2003 (verändert)

Anhang 5

Nanosensoren und Aktuatoren

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
mechanische Sensoren	miniaturisierte Mikrosensoren (bzw. MEMS)	Halbleiter	ultradünne Schichten, laterale Nanostrukt.	Lithographie u. a.	Fahrzeugtechnik	Entwicklung
Sensoren für Position/Winkel/ Abstand, (Winkel-) Geschwindigkeit/ Drehzahl, Beschleunigung	GMR-Magnetfeld-Sensoren plus Gebermagnet	Metalle	ultradünne Schichten	CVD/PVD/MBE	Fahrzeugtechnik Luft- u. Raumfahrt Maschinenbau	Anwendung
akustische Sensoren	Ionenkanal-Protein in biomimetischer Membran über Nanopore	Biopolymer (Protein), (Triblockco-) Polymer	supramolekulare Struktur, ultradünne Schicht, Nanopore	Selbstorganisation	evtl. Analytik (Werkstoffprüfg.)	Forschung
Massensensor: Nanowaage	CNT-Biegebalken-sensor	Kohlenstoff	Nanoröhren	Gasabscheidung	(Bio-)Analytik	Forschung
AFM-, STM-Spitzen	für Analytik (Topographie, Tribologie) und Nanostrukturierung (SXM-Lithographie und -Abscheidung)	Kohlenstoff; Halbleiter (Si); Nitride	C-Nanoröhre; nanoskalige Spitze (3D-Nanostruktur)	Gasphasenabscheidung u. molek. Manipul.; Ätzverfahren	Nanotechnologie Forschung	Anwendung in Forschung
Magnetfeldsensoren	GMR-Sensoren, einschl. Festplatten-Schreib-/Lese-Köpfe	Metalle	ultradünne Schichten	CVD/PVD/MBE	I u. K Medizin Werkstoffprüfg. (Luft- u. Raumfahrt, Fahrzeugbau u. a. m.), Geologie	Anwendung (I u. K) Forschung/Entwicklung (Rest)
	EMR-Festplatten-Schreib-/Lese-Köpfe	Halbleiter (z. B. InSb[Si])	ultradünne Schichten (Quantentrog), laterale Nanostrukturen	Lithographie etc.	I u. K (Medizin)	Forschung/ Entwicklung
	BMR-Festplatten-Schreib-/Lese-Köpfe	Metall (Ni)	Nanokontakt/ Nanodraht/Cluster	elektrochemische Abscheidung	I u. K (Medizin)	Forschung

noch Anhang 5

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		**nanobasierter Stoff/ Werkstoff**	**nanoskalige Basisstruktur**	**Herstellung**	**Branche**	**Status**
noch **Magnetfeldsensoren**	SQUID (supraleitendes Quanteninterferometer)	Metalle (Nb) oder HTSL-Oxide (YBCO), Isolator-Oxid (z. B. PrBaCuGaO)	ultradünne Schichten		Medizin Werkstoffprüfg. (Luft- u. Raumf., Fahrzeugbau u. a. m.), Geologie	Anwendung
	spinpolarisiertes Rastertunnelmikroskop (SP-STM)	Metalle (ferromagn.); Halbleiter (GaAs)	ultradünne Schichten, ultrafeine Spitzen	PVD, Ätzen	Analytik	Anwendung
	Magnetkraftmikroskop (MFM)	Metalle (ferromagn.); Halbleiter/Nitride	ultradünne Schichten, ultrafeine Spitzen	PVD, Ätzen	Analytik	Anwendung
	optisches Nahfeldmikroskop mit Kerr-Effekt (MOKE-SNOM)	Glas; Metall (Ag)	ultradünne Schichten, ultrafeine Spitzen; Nanopartikel	PVD, Ätzen, …	Analytik	Anwendung
Infrarot-Sensoren	QWIP (Quantentrog-IR-Photodetektor)	(Verbindungs-) Halbleiter	ultradünne Schichten	CVD, PVD, Selbstorganisation	I u. K Rüstung	Anwendung
	QDIP (Quantenpunkt-IR-Photodetektor)	(Verbindungs-) Halbleiter	Nanokristalle/Cluster	Selbstorganisation Lithographie u. Gasphasenabscheidung	I u. K Rüstung Medizin	Forschung
künstliche Retina	mit Bakteriorhodopsin als photoelektrischer Komponente	Protein (Bakteriorhodopsin)	Molekül, ggf. supramolek. Strukt.	Biotechnologie	Medizin	Forschung
Temperatursensoren	„Thermolabel“ (Sensor für erlebte Temperaturüber- oder -unterschreitung	n.bek. (evtl. Oxid oder Polymer)	n. bek. (evtl. ultradünne nanoraue Schichten)	n. bek.	Lebensmittel Medizin	Anwendung
	Rasterwärmemikroskop (SThM)	Metalle	ultrafeine Spitze		I u. K Analytik	Anwendung

noch Anhang 5

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **Temperatur-sensoren**	Polymerized Crystalline Colloidal Array (PCCA) (Farbverschiebung durch T-Änderung)	Polymere (PS, PAA, …)	Nanopartikel	Kolloidchemie	Lebensmittel Bauwesen Konsumgüter etc.	Forschung
Chemosensoren: Gassensoren	konduktometrische Metalloxid-Sensoren	Oxide (u. a. Sn-, Ti-, W-, Mo-, Zn-Oxid)	Nanokristalle	PVD u. a.	div.	Entwicklung
	konduktometrischer SWCNT-Gassensor	Kohlenstoff	Nanoröhren (SWCNT)	Gasabscheidung		Forschung
	konduktometrischer H_2-Sensor	Metall (Pd)	Nanodrähte aus Nanokristallen	elektrochemische Abscheidung		Forschung
Chemosensoren: Feuchtigkeitssensor	Biegebalkensensor, chemisch funktionalisiert oder mit nanoporösem Zeolithfilm	Oxid (Zeolith)	Nanokristalle mit Nanoporen	Selbstorganisation	Bauwesen Chemie Lebensmittelind. Fahrzeugbau etc.	Forschung
Chemosensoren: pH-Sensoren	kapazitive Elektrolyt-Isolator-Silizium-Sensoren	Nitride (Si_3N_4), Oxide (Ta_2O_5, Al_2O_3)	ultradünne Schichten	PVD, CVD	div.	evtl. Anwendung
Chemosensoren	Polymerized Crystalline Colloidal Array (PCCA) (Farbverschiebung durch osmoseanalogen Prozess)	Polymere (PS, PAA, …)	Nanopartikel	Kolloidchemie	div.	Forschung
	Molekular geprägte Polymere (MIPs)	Polymere	Nanoporen	molekulares Prägen/ Selbstorganisation		
	Molekular geprägte Oberflächen	organische Moleküle (Thiole u. Templatmoleküle)	selbstorganisierte Monoschicht (SAM), Nanoporen	molekulares Prägen/ Selbstorganisation		
chemisch sensitive Rastersonden	chemisch funktionalisierte STM- und AFM-Spitzen	Metalle, Halbleiter, Nitride; molek. Verbindungen	ultradünne Schichten, ultrafeine Spitzen; Moleküle	PVD, Ätzen; atomare/molekulare Manipulation	Analytik	Anwendung

noch Anhang 5

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
elektrochemische Rastersonden	elektrochemisches Rastertunnel-mikroskop (EC-STM)	Metalle	ultrafeine Spitzen	Ätzverfahren	Analytik	Anwendung
	elektrochemisches Rasterkraft-mikroskop (EC-SFM)	Metalle; Halbleiter; Nitride	ultradünne Schichten; ultrafeine Spitzen	Ätzverfahren		
	Rasterionenleit-fähigkeitsmikroskop (SICM)	Glas	Nanopore			
Labs-on-a-Chip-Systeme, Bio-(Gen)-Chips	Nanofluidik (schalt-bare Molekularmem-branen, OF-Energ. statt Rohre)	evtl. Lipide	supramolek. Aggregat; ultradünne Schichten	Selbstorganisation usw.	Pharma Medizin Rüstung	frühe Forschung
	SAMs zur Biomol.- oder Zell-Immobili-sierung (f. Biosensoren)	organische Verbindungen	Moleküle ultradünne Schichten	Selbstorganisation µCP (Soft Lith.)		Anwendung
	(beschichtete) Halb-leiter-Quanten-punkte als Fluores-zenzmarker oder ramanaktive Marker	Verbindungshalb-leiter (z. B. CdSe), Polymere (z. B. PS); Metalle (z. B. Au)	Nanokristalle, ultradünne Schichten	div.		Anwendung
	Magnet. Nano-partikelmarker (auszulesen mit GMR-Sensor)	Oxid (Magnetit/γ-Fe_3O_4)	Nanokristalle	div.		Entwicklung
Aktoren/Effektoren	künstlicher Muskel aus CNT	Kohlenstoff (CNT)	Nanoröhren	Gasphasen-abscheidung	div.	Forschung
	molekulare Pinzet-ten aus CNT	Kohlenstoff (CNT)	Nanoröhren	Gasphasen-abscheidung; mole-kulare Manipulation	Nanotechnologie	Forschung

noch Anhang 5

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **Aktoren/Effektoren**	Motorproteine: F1-ATP(Synth)ase (Motor/Pumpe), Kinesin/Dynein u. Mikrotubuli, Aktin u. Myosin (Linearmotoren), Bakteriorhodopsin (Protonenpumpe)	Biopolymer (Proteine, Zucker, …)	supramolekulare Strukturen	Biotechnologie	Nanotechnologie	Forschung/Vision
Stoßdämpfer, Vibrationsdämpfer	Ferrofluide	Oxide (z. B. Fe_3O_4) Metalle (z. B. Co)	Nanokristalle	div.	Fahrzeugtechnik Luft- & Raumfahrt Rüstung	Anwendung

Quelle: INT 2003 (verändert)

Anhang 6

Informationsverarbeitung und -übermittlung

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
nanoelektronische Bauelemente	(C)MOS, Bipolartransistor	Halbleiter	ultradünne Schichten, laterale Nanostruktur	PVD/CVD/ Oxidation, Lithographie	I u. K	Entwicklung/ Anwendung
	HEMT (High Electron Mobility Transistor)	Verbindungshalbleiter	ultradünne Schichten, laterale Nanostruktur	PVD/CVD, Lithographie		Anwendung
	SET (Einzelelektronentransistor)	Metalle u. Oxide; Halbleiter (Si) u. Oxide; C-Nanoröhren	laterale Nanostruktur, ultradünne Schichten; Nanopartikel; Nanoröhren	Lithographie, PVD, Oxidation, Oxidation mit AFM, Ätzen,		Forschung
	RTD (Resonanztunneldiode), RTT (Resonanztunneltransistor)	Halbleiter	laterale Nanostruktur, ultradünne Schichten	Lithographie, PVD, Oxidation, Oxidation mit AFM		Forschung/ Entwicklung
	QCA Quantum Cellular Automata (gekoppelte Quantenpunkte)	Halbleiter	Nanokristalle/ Nanoinseln	Lithographie …		Forschung
	Einzelflussquantenlogiken (RSFQ) (muss nicht nano sein)	Supraleiter (Nb; YBCO) u. Oxid u. Metall	ultradünne Schichten, laterale Nanostruktur	Lithographie …		Forschung
	Durchkontaktierung von Stacks	Kohlenstoff; …	Nanoröhren, Nanodrähte	Gasphasenabscheidg.; …		Forschung/ Entwicklung
	Wärmesenken in ICs	Kohlenstoff	Nanoröhren	Gasphasenabscheidg.		Forschung/ Entwicklung
	Diffusionstrennschicht zw. Cu und Si (nötig bei Cu als Leitermaterial)	Nitride (SiN, SiON; ZrN)	ultradünne Schichten; Nanokristalle	(Ammono-) Oxidation; reakt. Sputtern		Anwendung; Forschung

noch Anhang 6

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **nanoelektronische Bauelemente**	Dielektrika mit hoher ε	Oxide (ZrO_2, Ta_2O_5, $(Ba,Sr)TiO_3$)	ultradünne Schichten	div.		Forschung
	Isolatoren mit niedriger Dielektrizitäts-konst. ε					
	metallische Nano-Leiterbahnen	Metalle	Nanodrähte (auf Oberflächen)	Lithographie u. elektroch. Abscheid.; PVD an Stufen auf Einkristall-Vizinalflächen		Anwendung Forschung
spintronische Bauelemente	Spintransistor	Halbleiter, Metalle	ultradünne Schichten, laterale Nanostrukturen	PVD/CVD, Lithographie	I u. K	Forschung
	NOT-Gatter, Shift-Register	Metalle (Ni-Fe)	ultradünne Schichten, laterale Nanostrukturen, Nanodrähte	PVD/CVD, Lithographie	I u. K	Forschung
rekonfigurierbare Logikchips	TMR-Elemente zu Gattern verknüpft	Metalle, Oxid	ultradünne Schichten	CVD/PVD/MBE	I u. K	Forschung
Magnetokoppler	potenzialfreie Signalübertragung mittels XMR-Bauelementen	Metalle, Oxid	ultradünne Schichten	CVD/PVD/MBE	I u. K	Forschung
Molekularelektronische Bauelemente	halbleitende SWCNT (pn-dotiert)	C-Nanoröhren	Nanoröhren	Gasphasen-abscheidg. u. molek. Manipul.	I u. K	Forschung, z. T. noch Vision
	SET (leitfähige Polymere)	Polymere	Molekül	organische Chemie, gesteuerte Selbstorganisation		
	molekulare Diode	organische Verbind. (Donor-Space-Akzeptor)	Molekül	organische Chemie, molekulare Manipulation m. SXM		

noch Anhang 6

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **Molekularelektronische Bauelemente**	elektrochemisch gesteuerte molekulare Schalter	organische Verbind.	Molekül	organische Chemie, molekulare Manipulation m. SXM		
	feldgesteuerte molekulare Schalter	organische Verbind. (z. B. Rotaxane, Catenane)	Molekül/ Supermolekül	organische Chemie, molekulare Manipulation m. SXM		
	photochromatische molekulare Schalter	Biomolekül (Protein, z. B. Bakteriorhodopsin-Derivat)	Molekül	Gentechnik		
	molekulare Drähte: CNT, DNA (ggf. dotiert od. metallisiert), $ErSi_2$, metallgefüllte Nanoröhren, Halbleiternanoröhren	C-Nanoröhren, Biopolymere, Halbleiter, Metalle (Fe), BN-Nanoröhren	Nanoröhren, supramolek. Strukturen, Nanodrähte	(mol. Manipulation, Selbstorganisation …)		
	Nanokonstruktionen/ -gerüste mittels synthetischer DNA	(synthetische) Biopolymere	Moleküle/supramolekulare Strukturen	Biotechnologie (PCR)		
Quantencomputer	unter Nutzung von Josephson-Kontakten	Supraleiter u. Oxid	ultradünne Schichten, laterale Nanostruktur	Lithographie …	I u. K	Forschung
	unter Nutzung von Quantenpunkten	Halbleiter	Nanoinseln	Lithographie, Sputtern, Gasabscheidung …		
DNA-Computer		Biopolymere (DNA, Enzyme)	supramolekulare Strukturen	PCR (Polymerasekettenreaktion)	I u. K	Forschung
Displays	Feldemissionsdisplays FED: C-Nanoröhrenfeldemitter	Kohlenstoff, evtl. auch Halbleiter	Nanoröhren	CCVD	I u. K Fahrzeugbau	Entwicklung
		Kohlenstoff	graphitische Nanodrähte in amorpher C-Matrix	Laser-Arc, anschl. Hochenergieionenbeschuss (1 GeV U)		

noch Anhang 6

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **Displays**	organ. Leucht-dioden /OLED	organische Verbin-dungen (Farbstoff-moleküle)	ultradünne Schichten	PVD (MBE), Spin-Coating, Tauchen		frühes Anwendung-stadium
	lichtemittierende Polymere LEP	Polymere	„textile Fäden“			Entwicklung
Displays, Beleuch-tung: NRC-LEDs (Non-resonant cavity)	nanostrukturierte Oberfläche zur besseren Licht-auskopplung	Halbleiter	laterale Nano-struktur (stochas-tisch oder periodisch)	„natürliche“ Litho-graphie (PS-Ku-geln); Interferenz-/ holograph. Lithographie	Fahrzeugbau Luft- u. Raumf. Haustechnik …	Forschung
„Display“-Textilien	schaltbar selbstleuchtend	Polymere (LEP) Verb.-Halbleiter (in leitf. Polym.)	„textile Fäden“ Nanokristalle (in Textilmatrix)	Längspoly-merisation, Spinnen, … …	Textil Rüstung	Forschung
Halbleiter-Laser	Quantenfilmlaser	Verbindungs-halbleiter	ultradünne Schichten	(MO)CVD, PVD(MBE)	I u. K Materialbearbeitung	Anwendung
	Quantenkaskaden-laser					Entwicklung
	Quantenpunktlaser	Verbindungs-halbleiter	Nanokristalle/ Cluster/Nanoinseln	Selbstorganisation; evtl. Ionenimplant.		F u. E, in Einführung
nichtlinear-opti-sche Bauelemente	Quantenpunkte in Glasmatrix	Halbleiter, (Edel-)Metalle	Nanokristalle/Cluster	Selbstorganisation; evtl. Ionenimplanta-tion; Tempern	I u. K	Entwicklung
photonische Kris-talle (inverse Opale)	für Photonik, Sensorik, Katalyse, Energietechnik (Elektroden)	Polymer/ Oxid oder Halbleiter	sphärische Nano-partikel/Nanoporen	Emulsions-polymerisation/ Fällung mit Templat	I u. K Chemie Energietechnik	Forschung
Spulenkerne für Mobilkommuni-kation und GPS-Empfänger	partiell kristallisierte metallische Gläser	Metalle (Legierun-gen; amorph, krist.) Teilkrist. metallische Gläser	Nanokomposit aus Metall-Nanokristalli-ten in amorpher Me-tallmatrix	partielle Nano-kristallisation	I u. K	Anwendung
Mikrowellenoszilla-toren für Mobil-kommunikation	RTD (Resonanz-Tunneldiode)	Halbleiter	laterale Nano-struktur, ultradünne Schichten	Lithographie, PVD, Oxidation, Oxidation mit AFM	I u. K	Forschung

noch Anhang 6

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **Mikrowellenoszillatoren für Mobilkommunikation**	Halbleiter-Übergitter als Bloch-Oszillatoren	Halbleiter (GaAs, AlGaAs, InGaAs)	laterale Nanostruktur, ultradünne Schichten	PVD, CVD		
Datenspeicher	MRAMs (nicht flüchtig)	Metalle, Oxid	ultradünne Schichten	PVD/MBE/CVD	I u. K	Entwicklung
	mechanischer Speicher: Millipede® (nichtflüchtig)	Polymer u. Hartstoff (ggf. C-Nanoröhre)	Nanogruben (Pits) durch Nanospitze	AFM-Lithographie		Forschung
	holographische Speicher	Biomoleküle (Bakteriorhodopsin), (Blockco-)Polymere	supramolekulare Strukturen	Biotechnologie, Polymerchemie		Entwicklung
	volloptisch (photonisch)	Halbleiter	Nanoinseln (Quantenpunkte)	Strained-layer heteroepitaxy (MBE, MOCVD)		Forschung
	FRAMs/FeRAMs (nichtflüchtig)	Oxide ($ZrO_2 \cdot Y_2O_3$-Pufferschicht, $SrRuO_3$-Elektrode, LaBiTi-Oxid)	ultradünne Schichten	div.		Forschung
Sicherheitsmerkmale, Plagiatschutz	Prägehologramme UV-aktive Codierung Au-Nanopartikel in Autoglasscheiben	wahrsch. Polymere Halbleiter/Oxide Fullerene Metall (Au)	Nanokristalle Moleküle Nanopartikel	wahrsch. Soft Lithography div. div.	Konsumgüter Fahrzeugtechnik	Versuchsproduktstadium/ (Entwicklung)
Fotokopierschutz	Kopierertrommel enth. Fullerene zum Übertragen von UV-sichtbaren Kopierschutz-Wasserzeichen	Kohlenstoff (Fullerene)	Moleküle/Fullerene C_{60}	Gasphasenabscheidg.	I u. K	Entwicklung
Farbfotokopierer, Farblaserdrucker	Trommel	org. Farbstoffe	Nanokomposit aus Farbstoffnanopartikeln in leitf. Polymer		I u. K	Anwendung

noch Anhang 6

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
Röntgenoptiken	insbes. für Lithographie	Metalle, Halbmetalle, Kohlenstoff, Carbide (Mo/Si, Ni/C, Ni/ B_4C, C/C)	ultradünne (Multi-)-Schichten	PVD (PLD, MSD, Laser-Arc, Ionenstrahlformgebg. [IBF; reakt. Ionenstrahlätzen RIBE]), Ionenstrahlplanarisierung (IBP)	I u. K Medizin Analytik astronom. Forschung	Entwicklung (Roadmap)

Quelle: INT 2003 (verändert)

Anhang 7

Lebenswissenschaften

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
Entschäumer		Oxid (TiO_2, SiO_2)	Nanokristalle	Flammhydrolyse	Pharma/Medizin Chemie	Anwendung
Nanopartikel-Marker	Quantenpunkte	Halbleiter, Metalle (Au)	Nanokristalle (ggf. in PS-Nanobead)	div.	Pharma/Medizin/ (Rüstung)	Anwendung
	magnet. Nanopartikel (auszulesen mit GMR-Sensor)	Oxid (Magnetit/γ-Fe_3O_4)	Nanokristalle	div.		Entwicklung
Wirkstoffträger	Liposomen	organische Moleküle (Lipide)	Liposomen	Selbstorganisation	Pharma/Medizin Kosmetik	Anwendung
	poröse Oxidpartikel	Oxid (Al_2O_3)	Nanoporen	Eloxalverfahren	Pharma/Medizin	
Drug-Delivery-Systeme (Therapeutika)	Wirkstofftransport und gezielte Wirkstofffreisetzung	Polymere, organische Moleküle (Lipide, Polyelektrolyte)	Dendrimere, Polyelektrolyt-Nanokapseln, Mizellen (Mikroemulsionen), Liposomen, Niosomen, Solid Lipid Nanoparticles (SLN)	org.-chem. Synthese, Selbstorganisation, …	Pharma/Medizin	Entwicklung
Gentransfersysteme für die Gentechnologie	„Genpistole“	Metall (Au)	DNA-beschichtete Nanopartikel	div.	Medizin/Pharma Biotechnologie	Anwendung
	beschichtete Nanopartikel	Oxide (Quarz/SiO_2) u. Biomoleküle (Lektin)	ultradünn beschichtete Nanopartikel	div.		Forschung
biozide/antibakterielle Materialien	langsame Wirkstofffreisetzung aus Trägermaterial (z. B. PVC)	Metalle (Ag, Cu)	dispergierte Nanopartikel/ Nanokomposit	Sputtern (VERL) etc.	Medizin Textil Konsumgüter	Entwicklung/ Anwendung
biologische Dekontaminationsmittel	reaktive Nanopartikel	Oxide (z. B. MgO), beladen mit Halogenen (Cl_2, Br_2)	Nanopartikel	n. bek.	Pharma/Medizin/ (Rüstung)	Anwendung

n o c h Anhang 7

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		**nanobasierter Stoff/ Werkstoff**	**nanoskalige Basisstruktur**	**Herstellung**	**Branche**	**Status**
noch **biologische Dekontaminationsmittel**	Nanoemulsion	n. bek.	Nanoemulsion/ supramolekulare Aggregate/Micellen, …	n. bek.		Anwendung
	Peptid-Nanoröhren	Biopolymer	Peptid-Nanoröhren (supramolekulare Aggregate)	Selbstorganisation in Membran		Forschung
magnetische Hyperthermie		Oxid (Magnetit/γ-Fe_3O_4)	Nanopartikel	div.	Medizin	
Kontrastmittel (Diagnostika)	(Zeolithe für NMR, Ba-Verb. für Röntgen, …)	Oxide …	Nanopartikel	Kolloidchemie, …	Medizin	Forschung bis Anwendung
	magnetische Partikel für Magnetresonanztomographie (MRI)	Oxid (Magnetit/γ-Fe_3O_4), Metall (Co)	Nanopartikel	div.	Medizin	
Steuerung biologischer Prozesse	lokales Erhitzen von Biomolekülen mit RF-Nanoantennen	Metalle (Au)	Nanopartikel	div.	Medizin Biotechnologie	frühe Forschung
Röntgenkathoden	aus CNT	Kohlenstoff (Nanoröhren)	Nanoröhren	Gasphasenabscheidg. (PVD, CCVD)	Medizin Werkstoffforschg.	
Implantatmaterialien	inerte Werkstoffe	TiO_2-Nanoschicht auf Ti-Leg.; nanoraue Polymeroberflächen	ultradünne Schichten; laterale Nanostruktur	Oxidation evtl. Lithographie/ Sputtern	Medizin	Anwendung Forschung
	bioaktive Werkstoffe der 1. Generation: bioverträgliche poröse Schicht/ Gradientenschicht zum Einwachsen von Knochen	Al_2O_3-Ca-Apatit-Gradient	Nanoporen, ultradünne Schichten	z. B. Sol-Gel-Verf.		Anwendung

noch Anhang 7

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		nanobasierter Stoff/ Werkstoff	nanoskalige Basisstruktur	Herstellung	Branche	Status
noch **Implantat-materialien**	bioaktive Werkstoffe der 2. Generation: poröse Schicht mit bioaktiver/wachstumsfördernder Porenauskleidung (Wachstumsfaktoren …)	Biopolymere od. $Ca_3(PO_4)_2$ in SiO_2-Poren oder Polymermembranen; organische Moleküle (Wirkstoff als Nanopartikel)	Nanoporen; Nanopartikel	z. B. Sol-Gel-Verf. div.		Forschung
	gering wechselwirkende Oberflächen für Blutgefäßimplantate (Stents, Herzklappen)	Polymere	Nanoporen			Forschung
	nanoporöse Mikrokapseln mit Insulin produzierenden Zellen	Halbleiter (Si)	Nanoporen	Lithographie		Entwicklung
Substrate für Tissue-Engineering	nanoporös für Zuführung von Nährlösung und Wachstumsfaktoren		Nanoporen	div.	Medizin	
Kosmetikartikel	Effektpigmente	Oxide (TiO_2, Fe_2O_3, Fe_3O_4, SiO_2, Cr_2O_3) (auf Glimmerplättch. od. SiO_2-Kugeln)	ultradünne Schichten aus Nanopartikeln	nasschem. Abscheid.; SiO_2-Kugeln: Kolloidchemie	Kosmetik	Anwendung
	Hautgefühl	SiO_2-Kugeln u. -Plättchen („Nanokugellager“)	Nanopartikel			
	Faltenaufheller (Ronasphere LDP)	Oxide (TiO_2, Fe_2O_3)	amorphe Nanopartikel			

noch Anhang 7

nanotechnologiebasierte(s) Produkt/ Bauelement/Komponente/System		**nanobasierter Stoff/ Werkstoff**	**nanoskalige Basisstruktur**	**Herstellung**	**Branche**	**Status**
Sonnenschutzcreme	TiO_2-Nanokristalle;	Oxid (TiO_2);	Nanokristalle;	Flammhydrolyse;	Kosmetik	
	TiO_2-beschichtete monodisperse SiO_2- oder Polymerkugeln	Oxide (TiO_2, SiO_2), Polymere	Nanokristalle/ Cluster auf amorphen Nanopartikeln	Kolloidchemie/ Emulsionspolymeris.		
Zahnpasta	zum Glätten von Zähnen	Hydroxylapatit/ $Ca_5[OH/(PO_4)_3]$	Nanopartikel	div.	Kosmetik	Entwicklung

Quelle: INT 2003 (verändert)



Gesamtherstellung: H. Heenemann GmbH & Co., Buch- und Offsetdruckerei, Bessemerstraße 83–91, 12103 Berlin
Vertrieb: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, Amsterdamer Str. 192, 50735 Köln, Telefon (02 21) 97 66 340, Telefax (02 21) 97 66 344
ISSN 0722-8333